



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUHANI GRÖNLUND

NOJAPYÖRÄN TUOTEKEHITYS

Diplomityö

Tarkastaja: dosentti Juha Miettinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja
materiaalitekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 7. marraskuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

GRÖNLUND, JUHANI: Nojapyörän tuotekehitys

Diplomityö, 64 sivua, 4 liitesivua

Joulukuu 2013

Pääaine/painotus: konejärjestelmien suunnittelu

Tarkastaja: dosentti Juha Miettinen

Avainsanat: Nojapyörä, suunnittelu, tuotekehitys, innovointi, modulaarisuus

Nojapyörät ovat polkupyöriä, jotka eroavat tavallisista polkupyöristä, eli pystypyöristä, ajoasennon sekä rakenteen suhteen. Nojapyörässä, nimensä mukaisesti, ajoasennossa nojataan istuimeen. Etuna pystypyörään on pienempi ilmanvastus, koska otsapinta-ala pienenee, sekä parempi tuki poljennalle, jolloin voimantuotanto on tehokkaampaa. Nojapyörillä ajetut nopeusennätykset ovatkin huomattavasti suurempia kuin pystypyörällä ajetut.

Tämä diplomityön tavoitteena on kehittää uudenlainen nojapyörä. Työ koostuu kolmesta osuudesta: tuotekehityksen ja valmistettavuuden teorioiden esittelystä, tuotekehitysprosessista ja prototypoinnista, joka koostuu moduulien valmistuksesta ja testaamisesta. Teoriaosuudessa esitellään olemassa olevia tuotekehityksen, valmistuksen ja moduloinnin menetelmiä. Tuotekehityksessä edetään teorioiden mukaista prosessia noudattaen ja soveltaen. Prototypoinnin avulla voitiin todentaa teorioiden toimivuus. Tässä projektissa tuotekehitysprosessi vietiin loppuun asti, jolloin valmistettiin fyysinen tuote dokumentoinnin perusteella.

Työn luonteesta johtuen nojapyörän kehityksessä pyrittiin tutkimaan mahdollisimman monia asioita, joita ei esiinny nojapyörissä eikä pystypyörissä. Nojapyörään kehitettiin monia tavallisesta poikkeavia ratkaisuja, joista osa oli toimivia ja osa jouduttiin hylkäämään toimimattomina. Lopputuloksena saatiin toimiva nojapyörä, joka toimii hyvänä pohjana jatkokehitykselle.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

GRÖNLUND, JUHANI: Product Development of Recumbent Bicycle

Master of Science thesis, 64 pages, 4 appendix pages

December 2013

Major: Design of Machine Systems

Examiner: Docent Juha Miettinen

Keywords: recumbent bicycle, design, research and development, innovation, modularity

Recumbent bicycles differ from the more usual upright bicycles both by the configuration of the vehicle and by a distinctive reclined riding position. A three wheeled version of a recumbent bicycle is sometimes called a recumbent tricycle and a four wheeled version is called a recumbent quadracycle. Recumbent bicycles have some advantages compared to regular bicycles, for example, they often have better aerodynamics due to their smaller frontal profile. The seat in a typical recumbent bicycle will give support to the riders back, enabling them to better use their muscles. Recumbent bicycles tend to go faster than upright bicycles, which can be seen by comparing speed records set on upright bicycles and recumbent ones.

The aim of this thesis was to develop a new kind of recumbent tricycle. The thesis consists of three parts: first, an introduction to the theoretical background of product development and manufacturing, presented by a few theories of product development, manufacturing and modulation. The second part focuses on the process of product development. The third part is a report on the making of the prototype, including the actual making of modules and testing them.

The developing of the tricycle was done by applying and adapting theories introduced in the first part of the thesis. Making the prototype gave the opportunity to test the theories used, and finally the process of product development was completed by actually making a recumbent tricycle based on the theories tested.

The aim of this project was to come up with as many new approaches as possible, some of which turned out to be successful and others not. The final result was a functioning recumbent tricycle with many possibilities for future development.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön aiheena on nojapyörän tuotekehitys. Diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston teknisen suunnittelun laitokselle. Kiitän työn ohjaajaa ja tarkastajaa dosentti Juha Miettistä ohjauksesta sekä neuvoista työtä tehdessäni. Lisäksi kiitän yliopiston opettaja Jori Montosta neuvoista, opetuksesta sekä avusta diplomityö tehdessäni.

Yrjö ja Senja Koivusen säätiölle kiitokset projektin rahoittamisesta. Kiitokset hydraulikan sekä tuotantotekniikan laboratoriomestareille ja –insinööreille avusta prototyypin valmistuksen yhteydessä.

Lopuksi kiitän perhettäni sekä ystäviä joiden kanssa opiskelin. Viimeisenä haluan kiittää vaimoani Jenniä – kaikesta.

Tampereella marraskuussa 2013

Juhani Grönlund

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoite ja rajaukset	1
1.3	Työn rakenne.....	2
1.4	Nojapyörät.....	2
1.4.1.	Nojapyörien historia	2
1.4.2.	Nojapyörien rakenne	3
2	Tuotekehitysmenetelmät	5
2.1	Tuotekehitys	5
2.1.1.	TRIZ-ongelmanratkaisumenetelmä.....	10
2.2	Tekemällä oppiminen ”Hands on Engineering”	11
2.2.1.	Prototyypit osana tuotekehitystä	12
2.3	Valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden suunnittelu	16
2.3	Modulaarisuus	19
3	Valmistustekniset menetelmät	21
3.1	Putken taivutus	21
3.2	Hitsaus.....	22
3.3	Lujuustarkastelu	23
4	Nojapyörän tuotekehitysprosessi	25
4.1	Tehtävän selvitys.....	25
4.2	Luonnostelu.....	26
4.3	Kehittely	32
4.4	Viimeistely	32
5	Nojapyörän moduulien kehitys	33
5.1	Voimansiirto.....	33
5.1.1.	Kampiakseli.....	33
5.1.2.	Laakerointi	38
5.1.3.	Polkimien suunnittelu.....	39
5.1.4.	Ketjuveto	42
5.2	Runko	42
5.2.1.	Vetävä pyörä	44
5.2.2.	Ohjauslaitteisto.....	47
5.2.3.	Muu rungon prototypointi	52
5.2.4.	Runko kokonaisuutena	53
5.3	Komponentit.....	54
5.4	Rakenteen kestävyysarviointi	54
5.4.1.	Rungon lujuustarkastelu.....	55
5.5	Testaus.....	58
6	Yhteenveto	60
	Lähteet.....	62

LYHENTEET, TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

a	kiikhtyvvyys
A	murtovenymä
D	putken halkaisija
I	neliömomentti
R	keskitaivutussäde
BMX	Bicycle motocross, pyöräilyn alalaji, jossa ajetaan kilpaa radalla.
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided Design)
DFMA	valmistettavuuden suunnittelu (Design for Manufacturing and Assembly)
Dropout	englanninkielinen nimitys polkupyörän renkaan kiinnikkeille.
FEM	rakenteiden tietokoneavusteinen lujuusanalyysi (Finite Element method)
huonekaluputki	Yleinen nimitys ohutseinämäiselle putkelle, jonka myötöraja vähintään 235 Mpa.
kinneri	Yleisesti käytössä oleva nimitys velomobileille eli katetu-oille nojapyörille.
modulointi	Tuotteen jakaminen itsenäisiin toiminnallisiin kokonaisuuksiin, joille on määritelty selkeät ja vakioina pidettävät rajapinnat.
nojapyörä	Polkupyörä, jota ajetaan taaksepäin nojaten tuolia muistuttavalla istuimella.
raidetanko	Tanko, joka kääntää renkaita, kun käännetään hallintalaitetta, esim. ohjauspyörää.
olkakappale	Autossa oleva olkaniveleksi nivelletty kappale, johon on kiinnitetty rengas ja tukivarret.
otsapinta-ala	Kohtisuora poikkipinta-ala, jota käytetään ilmanvastusta laskettaessa.
pystypyörä	Tässä työssä perinteisestä polkupyörästä käytetty termi.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Polkupyöristä ensimmäisenä tulee mieleen kulkuneuvo, jossa on kaksi pyörää, satula ja ohjaustanko. Tämä ei kuitenkaan ole ainoa tapa toteuttaa polkupyörä. Perinteiselle polkupyörälle on olemassa vaihtoehtoja, josta yhdelle käytetään nimitystä nojapyörä.

Nojapyörässä polkemisasento muutetaan makaavammaksi, istutaan nojaten ja eteneminen tapahtuu jalat edellä. Ohjaustangon ei tarvitse sijaita etummaisena vaan makaavasta ajoasennosta johtuen se viedään jalkojen taakse, ja voidaan sijoittaa jopa penkkiä matalammalle. Nojapyörissä pyörien lukumäärä ei ole pelkästään kahteen keskittynyt, vaan myös kolmi- ja nelipyöräisiä nojapyöriä on olemassa.

Nojapyörillä on olemassa vankka kannattajakuntansa. Nojapyörävalmistajia on kuitenkin vähän ja markkinat ovat pienet verrattuna tavanomaiseen polkupyörään. Markkinat myös suurelta osin keskittyvät kaksipyöräisiin retkinojapyöriin. Nelipyöräinen kampselipohjaisella voimansiirrolla varustettu nojapyörä ei ole yleinen, mikä tekee siitä hyvän tutkimusalustan.

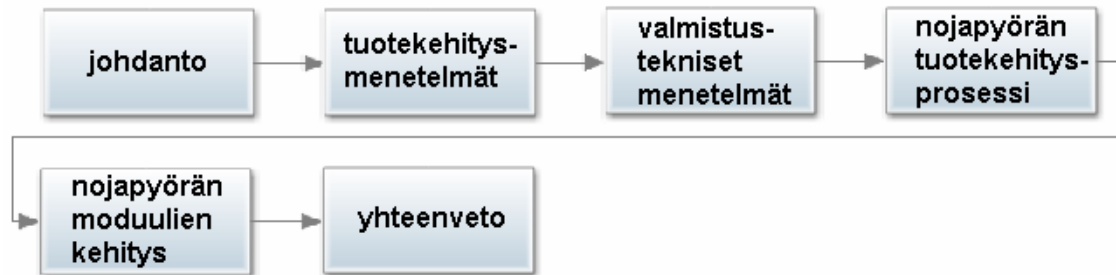
Harrastajien keskuudessa rakentelulla on suuri rooli nojapyöräharrastuksessa, itse tehdyt nojapyörät ovatkin yleisiä. Harrastajien keskuudesta saakin hyvin vinkkejä ja neuvoja, ja valmiille tuotteelle löytyy innokkaita jatkokehittäjiä, joten tuotteen elinkaari on jatkuva. Toimivat ja hyvät ideat jäävät elämään ja huonot ratkaisut karsiutuvat.

1.2 Työn tavoite ja rajaukset

Tässä työssä on tavoitteena kehittää nojapyörä, joka olisi valmistettavuudeltaan sekä jatkokehitettävyydeltään erinomainen. Kehitystyössä pyritään hyödyntämään olemassa olevaa tietoutta ja standardoituja ratkaisuja, jotta voidaan keskittyä uusia ideoita vaativiin kohteisiin. Projektiin lähdetään ennakkoluulottomasti ja pyritään uusia ideoita rohkeasti kokeilemalla kartoittamaan huonot ja hyvät ideat, jotta huomataan mihin suuntaan kehitystä kannattaa viedä. Huonojen, toimimattomien ideoiden löytäminen alussa on yhtä tärkeää kuin toimivien ideoiden löytäminen, jotta tiedetään mitä polkua ei kannata jatkaa pidemmälle. Projektin lopputuloksena kehitettävästä tuotteesta valmistetaan fyysinen prototyyppi, joka vastaa valmista tuotetta, sekä tuotetaan valmistuksen vaatimat konepiirustukset.

1.3 Työn rakenne

Työ jakautuu teoreettiseen osuuteen sekä kokeelliseen osuuteen. Teoriaosassa esitellään työn tekemisen yhteydessä käytetyt teoriat. Kokeellisessa osuudessa teorioiden avulla ratkaistaan asetettu tavoite ja raportoidaan tulokset. Työhön kuuluu suunnittelua sekä tuotteen valmistus, jotka dokumentoidaan.



Kuva 1.1. Vuokaavio diplomityön rakenteesta.

Luvut 2 ja 3 ovat teoriaosuutta, joissa käsitellään tämän diplomityön tekemisen kannalta tärkeimmät teoriat. Teoriaosuus aloitetaan tuotekehityksellä. Vaikka kyseessä ei olekaan täysin uuden tuotteen kehitys, joudutaan systemaattisesti kuitenkin kehittämään uusia ratkaisuja. Systemaattinen tuotekehitys on siten tärkeässä osassa ja se käydään lyhyesti läpi. Valmistettavuus, minkä parantaminen on työn tavoitteita, käsitellään seuraavaksi. Modulointia käsitellään lyhyesti, jotta selvitetään voidaanko modulaarisuudella parantaa valmistettavuutta. Prototyyppien valmistus käsitellään, koska työn toteutuksessa prototyyppien rakentaminen on vahvasti mukana ”Hands on Engineering” muodossa. Rakenteelle suoritetaan lujoustarkastelu, joten lujoustarkastelun metodi käydään läpi.

Luvussa 4 käsitellään tuotekehitysprosessi teorioiden tietämyksen mukaisesti. Tuotekehitysprosessi etenee pääsääntöisesti standardin VDI-2221 mukaisesti, hyödyntäen muita parhaiten kehitystä tukevia teorioita.

Luvussa 5 kehitetään nojapyörälle osakokonaisuuksia eli moduuleita, joista tuote koostuu. Moduulien kehittämisessä hyödynnetään parhaiten soveltuvia teorioita. Rakennetta kehitetään ns. ”Hands on Engineering” menetelmällä, mikä tarkoittaa erilaisten mahdollisuuksien kokeilua rakentamalla malli ja kokeilemalla miten se toimii. Rungon rakenteessa pyritään hyödyntämään olemassa olevaa tietoutta. Komponenttien valinta mukautuu osien saatavuuden ja budjetin sanelemana.

Luku 6 toimii yhteenvetona.

1.4 Nojapyörät

1.4.1. Nojapyörien historia

Nojapyörä on polkupyörä, jolla poljetaan nojaten tuolia muistuttavassa istuimessa (Linden). Nojapyörissä pyörien lukumäärä ei ole aina kaksi, toisin kuten perinteisissä pol-

kupyörissä on lähes aina. Perinteisten polkupyörien harvinaiset kolmipyöräiset versiot ovat tästä poikkeuksia.

Nojapyörien historia alkaa samoihin aikoihin kuin perinteisten pystypyörien. Polkupyörän monet tekniset ratkaisut, joista monet ovat vieläkin käytössä, kehitettiin 1800-luvun lopussa. Ensimmäinen tunnettu esitys nojapyörästä on vuodelta 1893. Kyseessä on pilapiirros miehestä istumassa mukavasti pyörien väliin rakennetussa tuolissa taustalla tavallisilla pyörillä polkevia miehiä tuskissaan. Samana vuonna rakennettiin ensimmäinen varsinainen nojapyörä. (Linden)

1900-luvun alussa Euroopassa oli monta nojapyörävalmistajaa. 1930-luvulla oli nojapyörän pyörien lukumäärä noussut neljään kappaleeseen ja Ranskassa Charles Mochet kehitti kaksipaikkaisen nelipyöräisen polkuauton halvaksi vaihtoehdoksi autolle. Mochet'n polkuauto tunnetaan nimellä velocar. Charles Mochet'n poika Georges Mochet jalosti kaksipaikkaisesta polkuautosta kaksipyöräisen nojapyörän, jolla kilpapyöräilijä Francois Faure rikkoi lähes kaksikymmentä vuotta vanhan polkupyörällä tunnin ajon maailmanennätyksen 7.7.1933 ajamalla 45,056 kilometrin matkan. Tämän vuoksi nojapyörien käyttö kilpailussa vietin kansainvälisen pyöräilyliiton UCI:n (Union Cycliste Internationale) käsiteltäväksi. On esitetty väitteitä, että nojapyörien kilpailukäytön käsittelyyn vienti olisi kateellisten kilpapyöräilijöiden aikaansaama. Vuonna 1934 UCI päätti sulkea nojapyörät pois kilpailuista kongressin äänin 58 vastaan 48. Päätös suurelta osin lopetti nojapyörien kehityksen ja ne vaipuivatkin unohduksiin neljäskymmeneksi vuodeksi. (Linden)

Georges Mochet jatkoi kuitenkin velocarin kehittämistä ja Faure ajoikin vuonna 1939 tunnin aikana yli 50 kilometriä, ensimmäisenä pyöräilijänä maailmassa. Perinteisellä polkupyörällä 50 kilometrin rajan rikkomista saatiin odottaa 1980-luvulle asti. Vuonna 2012 on nojapyörien ennätys noussut yli 90 kilometrin matkaan tunnissa perinteisten polkupyörien jäädessä 56 kilometriin (UCI).

Ennen toista maailmansotaa Euroopassa oli toistakymmentä nojapyörävalmistajaa, mutta sota katkaisi kehityksen niiltäkin jotka UCI:n päätöksen jälkeen olivat jatkaneet. Autojen yleistymistä sotien jälkeen pidetään yhtenä nojapyöriä kohtaan tunnettua mielenkiintoa vähentävänä tekijänä. Vasta 1970-luvun puolivälissä alkoivat nojapyörät herättää laajempaa kiinnostusta. Vuonna 1976 perustettiin International Human Powered Vehicle Association (IHPVA) järjestämään kilpailuja ihmisvoimalla kulkeville kulkuneuvoille, mikä sai innostuksen nojapyöriä kohtaan kasvamaan. Innostuksen kasvu näkyi myös kaupallisten toimijoiden ilmaantumisena. Sekä Euroopassa että Yhdysvalloissa on nykyään monia nojapyörävalmistajia. (Linden)

1.4.2. Nojapyörien rakenne

Nojapyörällä ajettaessa ajoasento poikkeaa totutusta. Perinteisesti polkupyöräilijä istuu hiukan etukenossa nojaten käsillään ohjaustankoon, jolloin asentoa voisi pitää jopa osittain seisovana. Nojapyöräilijä nojaa penkin selkänojaan ja eteneminen tapahtuu jalat edellä. Nojapyörä on ajoasennon vuoksi perinteiseen polkupyörään verrattuna matalampi, mikä pienentää ilmanvastusta.

Nojapyörissä veto on mahdollista toteuttaa sekä takapyörälle, tai etupyörälle. Perinteisissä polkupyörissä siirryttiin takapyörävetoon ketjuvedon keksimisen jälkeen. Nojapyörissä pyörien ohjaus voidaan toteuttaa sekä kääntyvällä etupyörällä että takapyöräohjauksena. Nämä kaksi ominaisuutta antavat nojapyörien rakentajille vapaammat kädet suunnittelulle.



Kuva 1.2. Etuvetoinen Cruzbike ja takavetoinen Bacchetta. (www.cruzbike.com
www.bacchettabikes.com)

Pyörien määrä nojapyörissä ei ole rakenteen sanelemana jäänyt kahteen kappaleeseen. Kolmi- ja nelipyöräiset nojapyörät toimivat käännettäessä polkupyörää paremmin matalamman painopisteen ansiosta. Painopisteen ollessa korkealla voivat kurvin ulkoreunalla olevat renkaat pyrkiä nousemaan ilmaan. Kolmi- ja nelipyöräisten etuna voidaan pitää myös sitä, etteivät ne kaadu paikallaan ollessaan. Pysähtyessä ei tarvitse laskea jalkoja polkimilta ja mäkinousussa voidaan käyttää erittäin kevyttä välitystä, koska pyörä ei kaadu vauhdin hidastuessa.



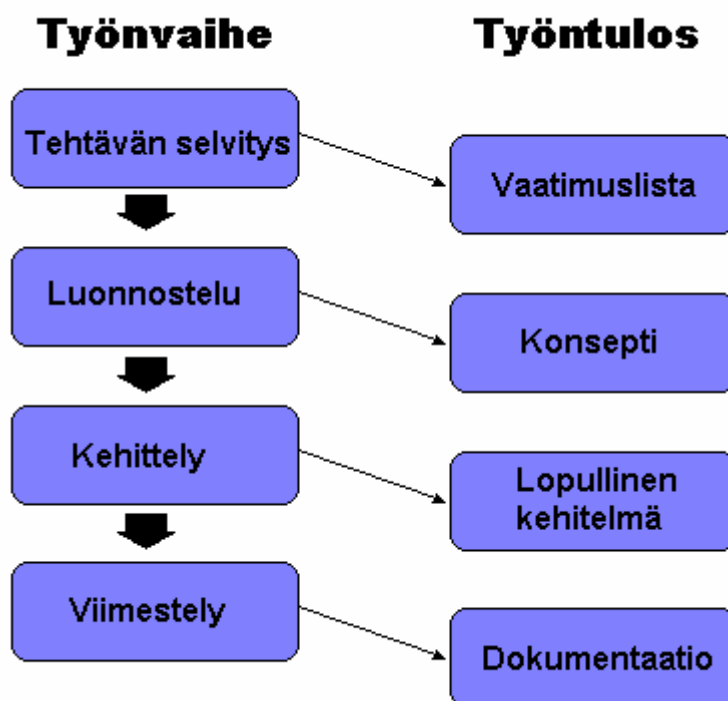
Kuva 1.3. Kolmipyöräiset nojapyörät, delta-mallinen vasemmalla ja tadpole (nuijapää) oikealla. (www.hasebikes.com, www.hpvelotechnik.com)

Komponentteina nojapyörä ja perinteinen polkupyörä käyttävät samoja. Komponentit ovat äärimmäisen standardoituja ja vuosikymmenten kehityksen tuloksia, joten on ymmärrettävää että nojapyörät on tehty yhteensopiviksi jo olemassa olevien komponenttien kanssa.

2 TUOTEKEHITYSMENETELMÄT

2.1 Tuotekehitys

Tässä työssä käytetty tuotekehitysmenetelmä on saksalaisen standardin VDI 2221 mukainen. Prosessin tarkoituksena on mahdollistaa tuotteen kehitys joko olemassa olevaa tuotetta parantaen tai luomalla kokonaan uusi tuote.



Kuva 2.2. Tuotekehitysprosessin rakenne. (mukaillen Pahl & Beitz)

Suunnittelu aloitetaan **tehtävän selvittelyllä**. Selvittämään pyritään markkinoiden tilanne, yrityksen tilanne, tuotteiden ideointi sekä määräykset ja lait. Selvittelyllä luodaan vaatimuslista. Vaatimuslista on koko tuotekehityksen ajan mukana ja muuttuu tarvittaessa kehityksen mukaan. (Pahl & Beitz 1990, s.59-63)

Prosessin alussa tunnistetaan tuotteeseen kohdistuvat vaatimukset ja toiveet. Nämä kirjoitetaan vaatimuslistaan. Vaatimukset tulee täyttää, tai muuten ratkaisu hylätään. Toivomukset pyritään täyttämään, jos niistä koituvat kustannukset ovat sallittuja. Lyömättä lukkoon mitään tiettyä ratkaisua, vaatimuksiin ja toiveisiin täytyy liittää tiedot määrästä ja laadusta. Vaatimukset täytyy ilmoittaa täsmällisinä lukuarvoina, mutta jos

se ei ole mahdollista, voidaan käyttää myös tarkasti muotoiltua sanallista kuvausta. (Pahl & Beitz 1990, s.64)

Luonnosteluvaihe seuraa vaatimuslistan laadintaa. Tässä vaiheessa vaatimuslistasta muodostetaan periaatteellinen ratkaisu eli konsepti. Tämä toteutetaan seuraavin työaskelein: abstrahointi, toimintorakenteen laatiminen sekä vaikutusperiaatteiden etsintä.

Abstrahoimalla tunnistetaan oleelliset ongelmat. Abstrahoinnissa ei oteta huomioon yksilöllisyyttä ja tilapäisyyttä, vaan yritetään korostaa yleispätevyyttä ja oleellista (Pahl & Beitz 1990, s.73).

Abstrahointi suoritetaan viidellä askeleella:

- 1) Jätetään ajatuksissa toivomukset pois.
- 2) Jätetään pois vaatimukset, jotka eivät ole oleellisia.
- 3) Muutetaan määrälliset toteamukset laadullisiksi.
- 4) Laajennetaan mielekkäästi tähän asti tunnettua.
- 5) Muotoillaan ongelma ratkaisuun nähden neutraalisti.

Viiden askeleen tuloksena saadaan ongelma lauseen muodossa. (Pahl & Beitz 1990, s.72-77)

Toimintorakenteen laatiminen suoritetaan abstrahoinnin avulla saadulle ongelmalle. Toimintorakenne esitetään lohkokaaaviona, kytkentäkaaviona tai kulkukaaviona. Kokonaistoiminto jaetaan osatoimintoihin, jotta saadaan yksinkertaistettua ja havainnollistettua tehtävän asettelua. Osatoimintoja voidaan kehittää erikseen osasysteeminä. (Pahl & Beitz 1990, s. 81-98)



Kuva 2.1. Lohkokaaviossa on esitettyä energian, aineen ja signaalin muunnos. Ratkaisu on vielä tuntematon. Tehtävä tai toiminto voidaan kuvailla tulo- ja lähtösuureiden avulla. (Pahl & Beitz 1990, s. 24)

Osatoimintoja varten on löydettävä vaikutusperiaatteita, jotka myöhemmin yhdistetään vaikutusrakenteiksi. Nämä ovat toiminnon toteuttamista varten olevat fysikaaliset ilmiön sekä geometriset ja aineelliset tunnusmerkit. Menetelmiä vaikutusperiaatteiden löytämiseksi ovat:

- tavanomaiset menetelmät (kirjallisuustutkimukset, luonnon järjestelmien analyysit, tunnettujen teknisten systeemien analysointi, analogiatarkastelut sekä mittaukset ja mallikokeet)
- intuitiiviset menetelmät (aivoriihi, metodi 635, galleriametodi, delfimetodi, synektiikka ja yhdistetty menettelytapa)
- diskursiivisesti painottuvat menetelmät (sovellettavan fysikaalisen ilmiön järjestelmällinen tutkiminen, systemaattinen etsintä jäsentelykaavioiden avulla ja konstruktioluetteloiden käyttö) (Pahl & Beitz 1990, s.99-125)

Vaikutusperiaatteet yhdistetään kokonaisuudeksi, jotta saadaan aikaiseksi kokonaisu toiminta. Osatoimintoja voidaan yhdistellä erilaisin menetelmin (järjestelmällinen yhdistely, matemaattisten menetelmien avulla) pyrkimyksenä valita sopivin muunnelmien kokonaisuus. Ratkaisuja on konkretisoitava, jotta niitä pystytään vertailemaan toisiinsa. Ilman konkretisoimista ratkaisut voivat muodostua sellaisiksi, ettei niitä voida toteuttaa. Parasta ratkaisua yritetään saavuttaa pisteyttämällä ratkaisuvaihtoehdot, jolloin saadaan objektiivinen tulos. Pistearvion pitää ilmoittaa ratkaisun ”arvo” tai ”hyöty” tai ”vahvuus” ennalta asetettuun tavoitteeseen nähden (Pahl & Beitz 1990, s.140). Arviointikriteerien lähtökohtana ovat asetetut tavoitteet, joiden pohjalta arviointikriteerit muodostuvat. Arviointikriteereille luodaan myös painotus tärkeyden mukaan, jolloin vaatimuslistaan voidaan liittää painokertoimet tärkeyden mukaan. (Pahl & Beitz 1990, s.129-160)

Kehittely on se konstruoinnin vaihe, jossa teknisen tuotteen rakenne kehitetään vaikutusrakenteesta tai periaatteellisesta ratkaisusta lähtien teknisten ja taloudellisten näkökohtien mukaan yksikäsitteiseksi ja täydelliseksi. Kehittelyn tulos on ratkaisun rakennemuodon kiinnilyöminen. (Pahl & Beitz 1990, s.176)

Kehittelyssä käytetään apuna työaskelia. Työaskelien avulla tuotteelle luodaan ulkomuoto vaatimuslistan vaatimuksien mukaisesti. Päätoiminnon toteuttimien peruskonstruktointi tehdään ohjelistaan pitäytyen, tavanomaista työtapaa käyttämällä, mekaniikan, lujuusopin ja materiaaliopin mukaan. Rakennemuotoilun ohjelistasta on lista, jota seuraamalla otetaan huomioon rakennemuotoiluun vaikuttavat asiat. Rakennemuotoilussa on myös pääsäännöt, joita noudattamalla vältetään ongelmat rakennemuotoilussa. Pääsääntöjen mukaisesti tuote on yksikäsitteinen, yksinkertainen ja turvallinen. Pääsäännöt voidaan johtaa yleisistä tavoitteiden asetteluista: teknisen toiminnan toteutus, taloudellinen toteutus ja ihmisen ja ympäristön turvallisuus. (Pahl & Beitz 1990, s.176-184)

Rakennemuotoilussa on käytössä neljä periaatetta. Voiman johtamisen periaatteet, tehtävien jaon periaatteet, oman avun eli sisäisen apuvaikutuksen periaate sekä stabiliteetin ja bistabiliteetin periaatteet. Kaikkia periaatteita ei voida samassa teknisessä ratkaisussa toteuttaa, vaan jokin periaatteista on aina vaatimus ja muut toiveita. Periaatteita voidaan pitää strategioina, jotka koskevat vain tiettyä edellytystä. (Pahl & Beitz 1990, s.227-249)

Rakenteiden muotoiluohjeet ottavat huomioon fysikaaliset ilmiöt rakenteen laadinnassa. Muotoiluohjeet auttavat ottamaan huomioon alkuehdot ja erityisesti ohjeet täydentävät pääsääntöjä. Pahl ja Beitz käsittelevät teoksessaan monia ilmiöitä, mutta huomauttavat ettei lista ole täydellinen. Muotoiluohjelistan luonti onkin muodostettava olemassa olevan kirjallisuutta hyödyntäen, ottaen huomioon suunniteltavan tuotteen erityispiirteet. (Pahl & Beitz 1990, s.249-251)

Viimeinen vaihe Pahlin ja Beitzin tuotekehitysmetodissa on **viimeistely**. Viimeistelyllä tarkoitetaan sitä osaa tuotekehitysprosessissa, jossa teknisen kehitelmän kokoonpanorakenne täydennetään lopullisilla määräyksillä, jotka koskevat kaikkien yksittäisosien muotoa, mitoitus, pinnan laatua ja työaineita ja jossa harkitaan valmistus- ja käyttömahdollisuudet sekä lopulliset kustannukset ja laaditaan sitovat piirustukset ja

muut asiakirjat kehittämän aineellista toteuttamista ja hyödyntämistä varten. (Pahl & Beitz 1990, s.458)

Ulrich & Eppingerin totekehitysmenetelmä

Tuotekehitys jaetaan Ulrichin ja Eppingerin teorian mukaan kuuteen vaiheeseen.

Nollavaihe on suunnitelman teko (engl. planning). Ensimmäinen varsinainen vaihe on konseptin kehitys (engl. concept development). Toinen vaihe on suunnittelu systeemitasolla (engl. system-level design). Kolmas vaihe on yksityiskohtainen suunnittelu (engl. detail design). Neljäs vaihe on testaus ja jalostus (engl. testing and refinement). Viides ja viimeinen vaihe on tuotannon aloitus (engl. product ramp-up). (Ulrich & Eppinger 1995, s.15)

Ian Wrightin tuotekehitysmenetelmä

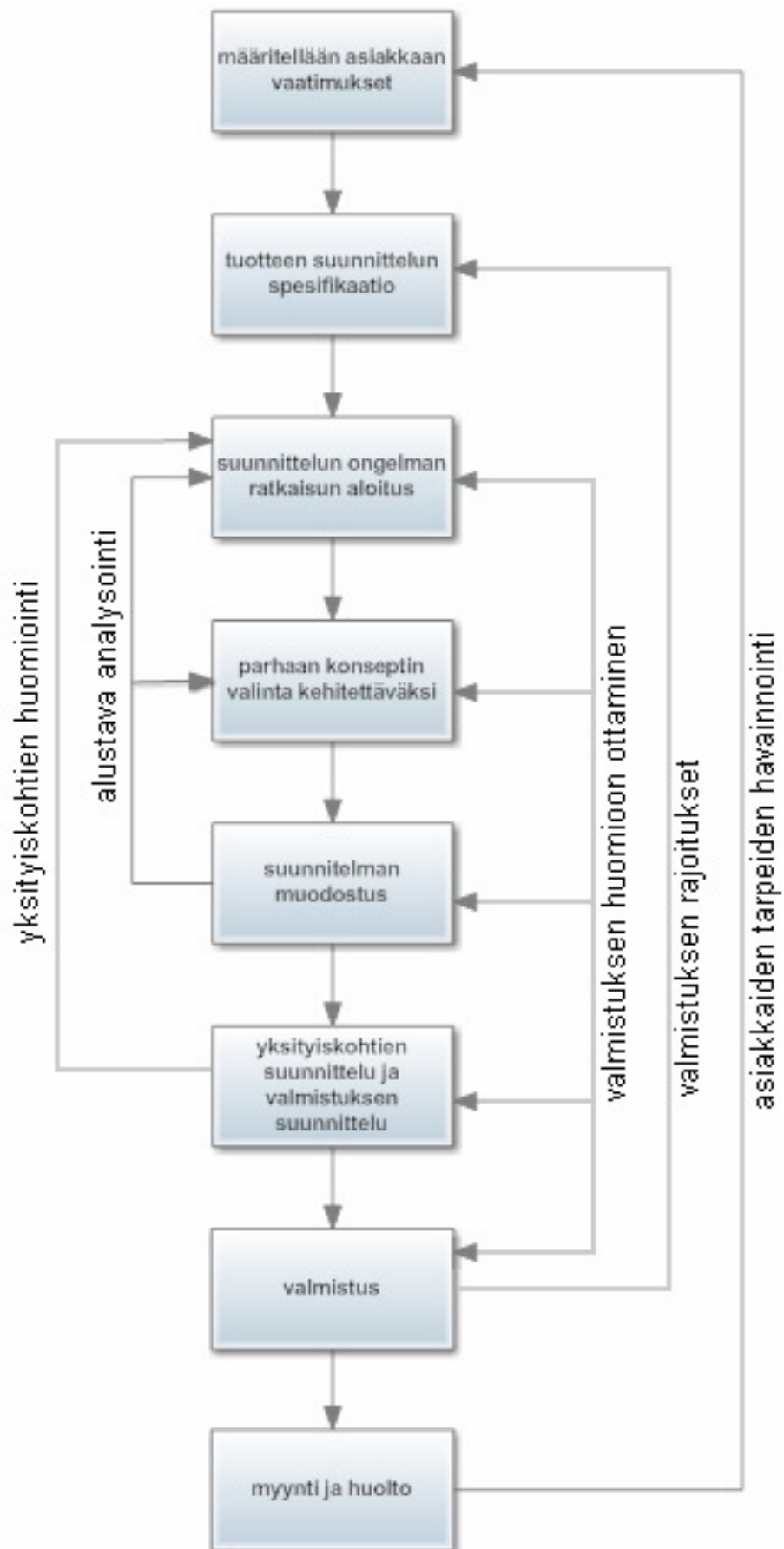
Ian Wrightin tuotekehitysprosessi on myös kuusivaiheinen. Ensimmäinen vaihe on asiakkaiden vaatimusten selvitys. Prosessin lähtökohtana on valmistaa tuotteita asiakkaalle, eikä kehittää tuotetta, jolle haetaan asiakaskunta tuotteen valmistuttua. (Wright)

Toisessa vaiheessa tuotteen suunnittelu spesifioidaan. Tässä vaiheessa asiakkaiden vaatimukset muutetaan mahdollisimman täydellisiksi kuvauksiksi, jotta insinöörien olisi mahdollisimman helppo ymmärtää halutut ominaisuudet. Tämän jälkeen voidaan aloittaa innovaatioiden miettiminen. (Wright)

Kolmannessa vaiheessa suunnittelun ongelmaa aletaan ratkaista. Ratkaisua haetaan kehittämällä mahdollisimman monta erilaista ratkaisuvaihtoehtoa. ”Mitä suurempi on vaihtoehtojen määrä, sitä todennäköisemmin joukossa on hyvä, ellei jopa loistava ratkaisu.” Neljännessä vaiheessa valitaan paras vaihtoehto ongelman ratkaisuksi ja sitä ruvetaan kehittämään. Viidennessä vaiheessa prosessi muodostetaan (engl. embodiment), eli sille annetaan muoto, joka voi olla joko konkreettinen tai ajatuksen tasolla. (Wright)

Kuudes vaihe on suunnittelun loppuunsaattaminen. Tässä vaiheessa tuote viimeistellään ja suunnitellaan sen valmistus. (Wright)

Prosessi elää kokoaikaisesti palautteiden ansiosta. Palautesilmukat ottavat huomioon eri kehitysvaiheet ja palauttavat kehityksen takaisin alkuun, jos huomataan että tiettyä asiaa ei ole huomioitu kehityksessä. Esimerkiksi valmistusmenetelmät sanelevat kuinka tuote voidaan valmistaa. (Wright)



Kuva 2.3. Suunnitteluprosessi Wrightiä mukaillen (Wright)

2.1.1. TRIZ-ongelmanratkaisumenetelmä

TRIZ-menetelmä on entisessä Neuvostoliitossa 1940-luvulta alkaneen kehityksen tuloksena syntynyt ongelmanratkaisun metodi. Teorian keksijä Genrih S. Altshuller kehitti TRIZ-metodia viiden vuosikymmenen ajan. 1990-luvulta lähtien teoriaa on käytetty myös teollisuudessa ja opetuskäytössä. TRIZ on lyhenne venäjänkielisistä sanoista ”*teorija rezhenija izobretatelskih zadach*”, mikä tarkoittaa teknisen ongelmanratkaisun teoriaa. (Rantanen 2002)

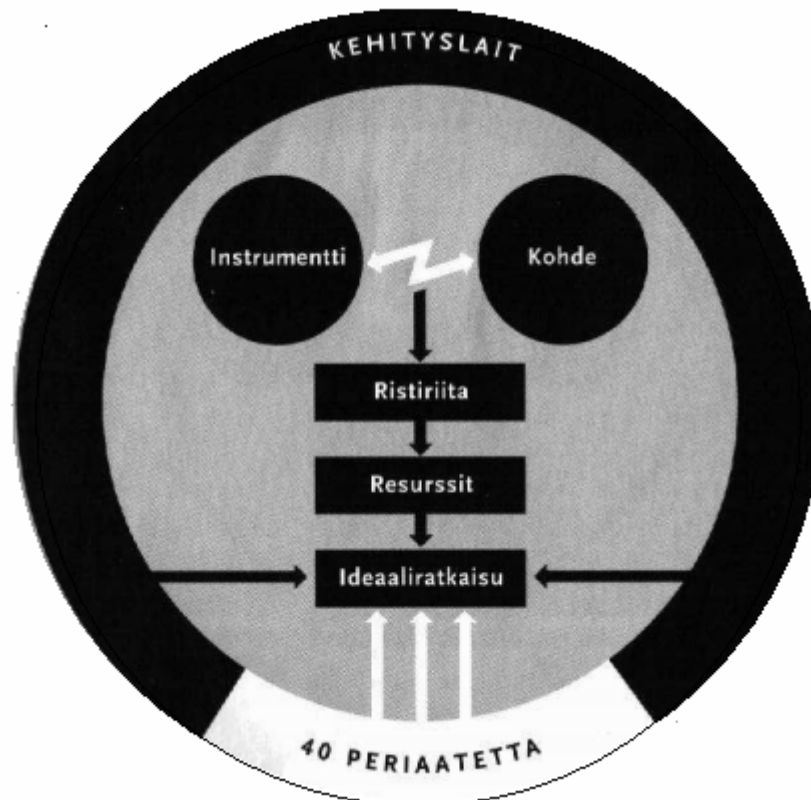
TRIZ-menetelmän ideana on ratkaista ristiriita. Menetelmän keksijän mukaan hyvät tekniset ratkaisut ovat ristiriitojen ratkeamisia. TRIZ-menetelmässä ristiriitaa kuvataan kohteen ja instrumentin konfliktiksi systeemissä. Instrumentti on asia, jolla tehdään kohteelle jotain. Esimerkiksi kirveenterä on instrumentti, joka halkaisee puupölyn eli kohteen. Ristiriita syntyy kun kirveenterän ominaisuuksia kehitetään. Painavampi terä halkaisee paremmin mutta paino vaikeuttaa kirveen käsittelyä. Ristiriidan muodostavat silloin painavuus ja hankala käytettävyys, johon ratkaisu olisi painava, mutta kuitenkin helposti käytettävä. (Rantanen 2002, s.27)

Ristiriitaa lähdetään ratkaisemaan resurssien avulla. Resurssien avulla yritetään saada aikaan muutos, joka tulisi näennäisesti tyhjältä. Molok-jäteastia on esimerkki, jossa ristiriitana oli pieni koko ja suuri tilavuus. Ristiriita saatiin ratkaistua sijoittamalla astia maan alle, jolloin pintaosa jäi kooltaan pieneksi. Resurssit tarkoittavat saatavissa olevia aineita ja energiaa, joita ei ole vielä hyödynnetty. (Rantanen 2002, s. 29)

Hyödyntämällä resursseja voidaan poistaa ristiriita ja toteuttaa ideaaliratkaisu. Ideaaliratkaisussa resurssit muuttavat systeemiä halutuksi, kuten resurssina materiaali. Tällöin esimerkiksi vaihtamalla teräs alumiiniksi voidaan muuttaa rakenteen painoa kevyemmäksi. Ideaaliratkaisu on idea, joka vaatii toteutuksen. (Rantanen 2002, s. 30-31)

Ideaaliratkaisun toteuttamisessa käytetään apuna teknisten systeemien kehityslakeja. Tärkeitä kehityslakeja ovat: kehityksen epätasaisuus, integroituminen ylemmän tason systeemiin, siirtyminen mikrotasolle, vuorovaikutusten kasvun laki ja systeemin laajeneminen ja supistuminen. (Rantanen 2002, s.32)

Usein ratkaisumallit ovat samankaltaisia, joten TRIZ-menetelmässä ratkaisun löytämiseksi ovat käytössä innovatiiviset periaatteet. Innovatiiviset periaatteet ovat neljäkymmenen kohdan lista, johon on kerätty yleisimpiä ratkaisuvaihtoehtoja. Vaihtoehdot ovat sanamuodoiltaan yleisiä ja ne antavat vihjeitä oikean suunnan etsimiselle. Periaatteista ei siten välttämättä löydy valmista ratkaisua. (Rantanen 2002, s. 33)



Kuva 2.4. TRIZ-menetelmän kaavio. (Rantanen 2002, s.33)

2.2 Tekemällä oppiminen ”Hands on Engineering”

Tässä työssä ”Hands on Engineering”-käsitteellä tarkoitetaan tekemällä oppimista korostavaa opetusta. Teoriapohjana käytetään Coloradon yliopiston (University of Colorado) Hands on Engineering opetuskokonaisuutta sekä MIT:stä (Massachusetts Institute of Technology) lähtöisin olevaa CDIO-opetussuunnitelmaa. Kumpaakin opetuskokonaisuutta yhdistää ulkopuolelta, valmistavan teollisuuden työnantajilta, tullut toive insinöörin käytännön taitojen heikon osaamisen parantamisesta.

Coloradossa opetuksen kehittäminen sekä tarvittavat tilat on rahoitettu rahaston kautta. Rahaston pääoma on kerätty yrityksiltä, kuten esimerkiksi HP, AT&T ja Lockheed Martin. Työnantajat voivat tällä tavoin vaikuttaa opetusohjelmaan, jolloin sen käyneet opiskelijat palvelevat paremmin työnantajien vaatimuksia. (Carlson & Sullivan 1999)

CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) opetussuunnitelman tavoitteena on tasapainottaa opiskelijoiden teorian ja käytännön opetusta, mikä on epätasapainottunut teoriapainotteiseksi opiskelijamäärien noustessa. CDIO-opetussuunnitelmaa noudatettaessa on tarvitteena kasvattaa työelämärelevanssia ja työelämälähtöisyyttä. Tarkoituksena on, että teoriaa opiskeltaisiin käytännön kautta, eikä toisin päin, mikä on usein vallitseva käytäntö. (Crawley et al. 2007)

Tässä työssä keskitytään opetusmetodeista **tekemällä oppimiseen** tuotekehityksen näkökulmasta. Teorioista valitaan työkalut ja menetelmät, jotka soveltuvat tähän työhön. Prototyypin valmistus on tärkeässä roolissa tekemällä oppimisessa.

Coloradon yliopiston opetussuunnitelmaan kuuluu ensimmäisen vuoden opiskelijoiden projektikurssi, jonka aikana tutustutaan suunnitteluprosessiin hands-on näkökulmasta. Opiskelijat tutustuvat teorian ohella työvälineisiin ja niiden käyttöön.

2.2.1. Prototyypit osana tuotekehitystä

Tässä kappaleessa käsitellään prototypointia Ulrichia ja Eppingeriä mukaillen. Prototyypit voidaan jakaa kahden tekijän mukaan. Ensimmäinen tekijä on se aste kun prototyypistä tulee fyysinen tai analyyttinen. Fyysiset prototyypit ovat käsin kosketeltavia ja ne kuvaavat mahdollisimman tarkkaan tuotteen suunniteltuja ominaisuuksia, jotta prototyyppiä voidaan tutkia ja testata mahdollisimman hyvin. Fyysisten prototyyppien tarkoituksena on mahdollistaa kokeilu, jolla tutkitaan että suunniteltu toimii käytännössä. Analyyttisiä prototyyppijä käytetään kehitettäessä asioita, jotka eivät ole käsin kosketeltavia kuten matemaattiset mallit. Analyyttistä prototypointia on myös simulointi ja 3D-mallinnus. (Ulrich & Eppinger 1995, s.218-220)

Taulukossa 2.1. on esitelty jaottelua muutamalla esimerkillä.

Taulukko 2.1. Prototyyppien jako fyysisiin ja analyyttisiin

Fyysinen	Analyyttinen
Muotomalli	Simulointi
Pienoismalli	3D-mallinnus

Prototyyppijä käytetään tuotekehityksessä neljällä eri tavalla. Ensimmäinen tapa on **oppia** prototyypistä. Näin prototyypillä saadaan vastaukset kysymyksiin toimiiko tuote ja vastaako se asiakkaiden vaatimuksia. Toinen tapa on **kommunikaatio**, jossa prototyyppi on kommunikoinnin apuvälineenä. Käytössä on ulkonäkömalli (engl. looks like), jonka avulla on helpompi esitellä tuotetta yrityksen hierarkiassa ylemmille sekä ulkopuolisille toimijoille. Kolmannella tavalla, eli **integroinnilla** prototyyppi toteutetaan siten, että se koostuu komponenteista ja ratkaisuksista, joista tuote on suunniteltu rakennettavan. Prototyypillä on tarkoitus tutkia että osat sopivat yhteen ja toimivat toistensa kanssa suunnitellulla tavalla ja kokoonpano onnistuu suunnitellusti. Neljäs tapa toteuttaa prototyyppi on **rajapyykki** (engl. milestone). Prototyyppijä käytetään nimensä mukaisesti esittelemään saavutettua rajapyykkiä. Rajapyykkinä voi olla tuotteen toimivuus, jolla haetaan esim. rahoitusta tuotteen kehittämiseksi loppuun, jolloin ensin toteutetaan haluttu funktio ja sen jälkeen kehitetään tuotteelle ulkoasu. Prototyyppien käyttötapoja voi olla useampiakin kuin yksi prototyypistä kohden. Käytännöllistä olisikin toteuttaa prototyyppi siten, että se palvelisi mahdollisimman monella tavalla. (Ulrich & Eppinger 1995, s.220-222)

Taulukossa esitellään 2.2. prototypointitavat.

Taulukko 2.2. *Prototyyppien käyttötavat*

Käyttötavat	Mitä tutkitaan
Oppiminen	Tuotteen toimivuus sekä asiakkaiden vaatimuksiin vastaaminen
Kommunikaatio	Apuna tuotteen esittelyssä
Integrointi	Komponenttien yhteensopivuus ja toiminta
Rajapyykki	Saavutetun ominaisuuden tai toiminnan esittely

Prototypoinnin periaatteet avustavat tehtäessä päätöstä minkälainen prototyyppi sopii parhaiten käynnissä olevaan tuotekehitysprojektiin. Analyttinen prototyyppi on joustavampi kuin fyysinen prototyyppi. Mahdollisuuksien mukaan kannattaa käyttää analyttistä prototyyppiä niin pitkään kuin se on mahdollista. Koneensuunnittelussa CAD-mallia käyttämällä voidaan tuote muodostaa melko valmiiksi, jolloin fyysistä prototyyppiä tarvitaan mahdollisesti vain varmistamaan että tuote on mahdollista valmistaa. 3D-mallissa mittojen ja materiaalien vertailu on fyysiseen prototyyppiin verrattaessa äärimmäisen tehokasta. Fyysisillä prototyypeilla voidaan tutkia ennakoimattomia ilmiöitä, joita simulointi ei huomioi koska kaikkia fysiikan lakeja ei välttämättä ole huomioitu simulointiohjelmistossa. Valmistuksessa ei silloin välttämättä saavuteta haluttua toleranssitasoa, jolloin kokoonpano ei onnistu suunnitellun mukaisesti. (Ulrich & Eppinger 1995, s.223-224)

Prototypoinnilla voidaan vähentää kalliiden iterointien riskiä. Valmistettaessa valettua kappaletta muotin tekemiseen liittyy kalliita kustannuksia. Kun halutusta kappaleesta tehdään prototyyppi, jonka avulla muodostetaan muotille design, voidaan vähentää riskiä että muotti joudutaan tekemään uusiksi jos ensimmäinen versio on toimimaton. Ulrich ja Eppinger kertovat kirjassaan, että uudelleeniterointitarve laskee 30 prosentista viiteen prosenttiin kun muotinsuunnittelussa käytetään prototypointivaihetta. Prototyypin valmistus vaatii aikaa ja rahaa verrattuna siihen että prototyyppi jätetään suunnitteluprosessista pois. Päätettäväksi jää, onko todennäköisyyden laskeminen 25 prosenttiyksikköä kustannusten ja ajankäytön arvoisia. (Ulrich & Eppinger 1995, s.224-225)

Prototyypin valmistus voi vauhdittaa muita kehityksen vaiheita. Fyysinen prototyyppi helpottaa tuotteeseen tutustumista, joten osa kehityksestä saatetaan saada hyvin helposti tehtyä. Ulrich ja Eppinger mainitsevat valettavan kappaleen muotin tekemisen esimerkkinä, jossa muotinsuunnittelija säästää runsaasti aikaa päästessään käyttämään fyysistä prototyyppiä. Prototyypin avulla voidaan prosessista tehdä monitasoinen. Esimerkiksi teollinen muotoilija voi ryhtyä suunnittelemaan tuotteelle ulkomuotoa fyysisen prototyypin perusteella, josta on nähtävissä mittasuhteita, samaan aikaan kun sähkösuunnittelijat testaavat elektroniikan toimivuutta. (Ulrich & Eppinger 1995, s.225)



Kuva 2.5. Kuvassa on esimerkki työssä käytetystä prototyypistä, jolla testattiin ohjausvaihteen toimivuutta.

Suunnitelma prototyypin valintaan toteutetaan neljän askeleen metodilla, jonka avulla voidaan välttää sellaisten prototyyppien valinta, jotka eivät välttämättä edesauta haluttujen tavoitteiden saavuttamisessa. Kirjallisuudessa puhutaan ”suosta”, johon voidaan vajota väärin valintojen johdosta. Tehokkain tapa välttää tätä suota on määritellä prototyypit ennen kuin ryhdytään rakentamaan ja testaamaan prototyypeillä. (Ulrich & Eppinger 1995, s. 226)

Ensimmäinen askel on määritellä prototyypin käyttötarkoitus. Prototyypit jaettiin neljään kategoriaan oppiminen, kommunikaatio, integraatio ja rajapyykki, joista valitaan parhaiten tuotekehitysprojektia tukeva prototyyppimenetelmä. Valinta on hyvä toteuttaa listaamalla prototyypiltä vaaditut ominaisuudet, jolloin voidaan vaatimusten perusteella valita mihin kategorioihin kallistutaan. Usein projektin alussa on oppimiselle ja kommunikoinnille enemmän tarvetta kuin rajapyykille ja projektin edetessä suunta kallistuu integraatiota ja rajapyykkiä kohden. (Ulrich & Eppinger 1995, s.226-227)

Toinen askel on asettaa taso, jolla lähestytään prototyyppiä. Tämä tarkoittaa sitä, että selvitetään, mitkä kehitettävästä tuotteesta ovat asioita joiden kehittämisen avuksi tarvitaan prototyyppiä. Mahdollisesti tuotteesta ei tarvitse simuloida kaikkia funktioon liittyviä ominaisuuksia, vaan osa on jo valmiina tiedossa, jolloin prototyypissä ei tarvitse ottaa näitä huomioon. Esimerkiksi usein lopullisella ulkonäöllä ei ole vaikutusta tuotteen toimintaan. Valinta fyysisen ja analyttisen prototyypin välillä on hyvä toteuttaa tässä askeleessa. (Ulrich & Eppinger 1995, s.227-228)

Kolmas askel on hahmotella kokeellisen suunnittelun osuus. Prototyyppi tuo suunnitteluun kokeellista näkemystä teorian tueksi. Mitä suurempi rooli kehityksessä on tiettyjen asioiden yhteensopivuudella, sitä paremmin kokeellinen kehitys sopii projektiin. Kirjan esimerkissä on kehitetty pallohiirtä, eli peukalolla pyörítettävä kuulaa, jolloin kuulan halkaisijan valinnassa kokeellinen testaus prototyypillä oli tärkeätä sopivan halkaisijan löytämiseksi. (Ulrich & Eppinger 1995, s.228)

Neljäs askel on luoda prototypoinnille aikataulu. Aikataulu kootaan hankinnan, rakentamisen ja testaamisen osalta. Aikataulu voidaan jakaa kolmeen päivämäärään tavoitteiden mukaan, jolloin tietty vaihe saavutetaan. Hankinta tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että prototyypin rakentamiselle luodaan edellytykset. Kyseessä on toisin sanoen materiaalien ja osien kerääminen, ja aikataulun ensimmäinen päivämäärä on se, jona prototyyppi voidaan kasata, eli tarvittavat suunnitelmat ja materiaalit on hankittu. Toinen päivämäärä on se, jona prototyyppi voidaan ensimmäisen kerran käynnistää ja aloittaa testaaminen. Englanniksi tästä käytetään kuvaavaa nimitystä ”smoke test”, jolloin nähdään syntykö vain savua vai toimiiko laite. Kolmas päivämäärä on se, jona prototyyppi on suorittanut sille asetetun tavoitteen eli saadaan tulokset. (Ulrich & Eppinger 1995, s.228-229)

Prototyypin valintametodi soveltuu kaikkien neljän prototyyppitavan suunnitteluun, kuitenkin rajapyykkiprototyypeille on olemassa omanlaisensa suunnitteluohjeistus. Rajapyykki on prototyyppitavoista monimutkaisin ja lähinnä lopullista tuotetta. Rajapyykki-prototyypit voidaankin jakaa kolmeen kategoriaan ajallisesti tuotekehitysprojektin aikajanelle. Kategoriat ovat **alfa**, **beta** ja **esivalmistus**. (Ulrich & Eppinger 1995, s. 229)

Alfa-versiota käytetään usein testaamaan että tuote toimii suunnitellulla tavalla. To-teutukseen käytetään oikeiden osien kaltaisia komponentteja pienin eroin. Esimerkiksi jos tuotteessa on suunniteltu käytettävän valettuja osia, on alfan osat, yksittäiskappaleita kun ovat, valmistettu koneistamalla. Materiaalit eivät myöskään välttämättä vastaa käyt-töön tulevia, metallikappaleet voidaan korvata muovisilla tai muilla helpommin koneis-tettavilla materiaaleilla. Esimerkiksi valuraudan asemesta alumiinista koneistettu kappale yksittäiskappaleena on erittäin hyvin perusteltavissa koneistusominaisuuksien johdos-ta, vaikka materiaali onkin kalliimpaa. (Ulrich & Eppinger 1995, s. 229)

Beta-versio pyritään toteuttamaan suunnitellun mukaisesti oikeista komponenteista. Beta-versioita käytetäänkin tuotteen luotettavuuden testaamiseen ja esiin tulevien vir-heiden havaitsemiseen. Beta-versiota testattaessa ei olla vielä kiinnostuneita sarjatuotannosta, joten kokoonpano tapahtuu usein insinöörien toimesta yksittäiskappaleilla. (Ulrich & Eppinger 1995, s. 229)

Esivalmistusversio toteutetaan, nimensä mukaisesti, ennen valmistuksen aloittamis-ta. Versiolla testataan että valmistusprosessi toimii halutulla tavalla ja tuotteet ovat halu-tun laatutason mukaisia. Esivalmistusversion ei pitäisi poiketa valmiista tuotteesta, joten esivalmistusversion tuotteet voidaan, valmistusprosessin toimiessa, myydä kuluttajille ennakkoversioina. (Ulrich & Eppinger 1995, s. 229)

Prototyyppien valmistus on kallista ja aikaavievää, joten alfa-version prototyypistä pyritään luopumaan, jos se suinkin on mahdollista. Tuotteen ollessa samankaltainen kuin jo valmistuksen tuotepalettiin kuuluva tai hyvin yksinkertainen voidaan alfa-vaihe jättää pois. Tuotekehitysprojektissa olisi syytä asettaa prototyypeille tavoitteet sen suh-teen, minkälaisia prototyyppejä aiotaan tehdä ja aikatauluttaa niiden valmistus ja testa-us. Kokonaisuutena tarkastellessa huomataan mitkä versiot ovat tarpeellisia että saavu-tetaan haluttu vaihe projektissa. Projektin edetessä saatetaan huomata, ettei tiettyä kehi-tystä voida tehdä ilman prototyyppiä, jolloin se joudutaan lisäämään projektiin. Vastaa-

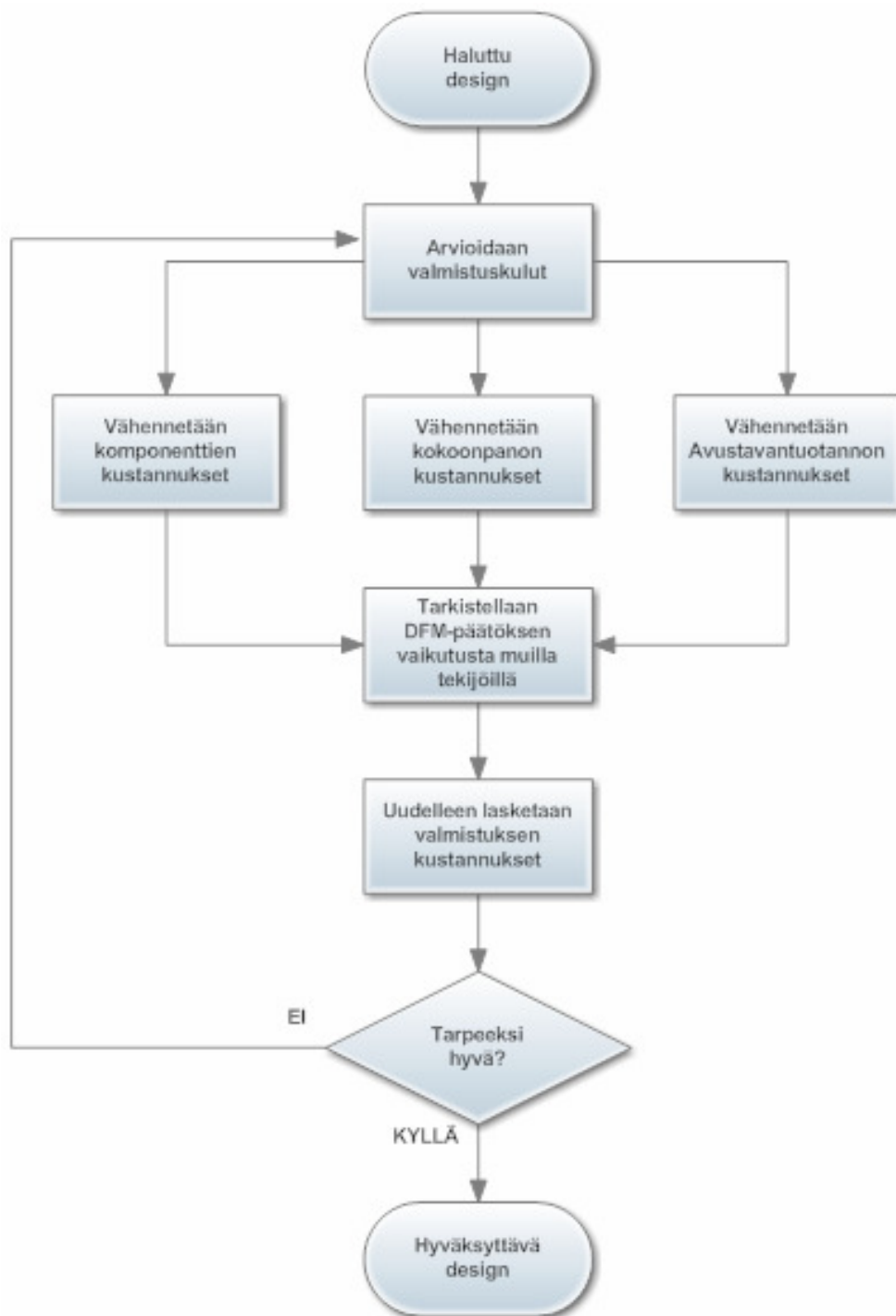
vasti jos on saavutettu haluttu kehitysvaihe, voidaan projektin aikataulusta pudottaa turha prototypointivaihe kokonaan pois. (Ulrich & Eppinger 1995, s.230)

2.3 Valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden suunnittelu

Valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden suunnittelusta (engl. Design for Manufacture and Assembly) käytetään lyhennettä DFMA. Se on ennakoiva ja samanaikainen suunnitteluprosessi, joka ottaa huomioon valmistettavuuden.

DFMA:n avulla suunniteltaessa pyritään minimoimaan osien ja kiinnikkeiden lukumäärä ja käyttämään standardiosia ja -mittoja. Komponenttivalinnoilla ja modulaarisilla alikokoonpanoilla voidaan nopeuttaa ja parantaa kokoonpanoa. Kokoonpanon näkökulmasta monitoiminen komponentti on parempi kuin monta yksitoimista. Itse keskittävät ratkaisut ja tavallisin työkaluin tapahtuva kokoaminen helpottavat kokoonpanoprosessia, sillä ne tekevät osien yhteensovittamisesta on vaivatonta.

Ulrichin ja Eppingerin mukaan tuotekehitysprosessin on otettava huomioon valmistettavuus. DFMA alkaa prosessin alusta, jolloin määritellään tuotteen toiminta ja tekniset tiedot. Valmistuskonseptin valinnassa hinta on yksi kriteereistä. Tuotteen teknisten tietojen muodostuessa joudutaan puntaroimaan haluttujen ominaisuuksien ja hinnan välillä. Esimerkiksi tuotteen keventäminen vaati joko kalliimpaa materiaalia tai suurempaa työmäärää esimerkiksi koneistamalla. Kuvassa 2.6. on esitetty vuokaavio, jossa nähdään hinnanmukaiset päätökset ja niiden vaikutus tuotteen kehitykselle. (Ulrich & Eppinger 1995, s.182)



Kuva 2.6. Ulrich & Eppinger'in DFMA metodin vuokaavio. (mukaillen Ulrich & Eppinger)

Valmistuskulujen arviointi on ensimmäinen vaihe DFMA-metodissa. Valmistussysteemiksi kutsuttua järjestelmää tarkastellaan input-output-metodilla eli prosessin tarvitsemien ja sen tuottamien asioiden perusteella. Tarvittavia asioita ovat raakamateriaali, valmiit komponentit, työvoima, energia ja tarvittavat välineet. Systeemi tuottaa lopputuotetta sekä jätettä. Kustannuksia tuottaa siten kaikki muu paitsi itse lopputuote. (Ulrich & Eppinger 1995, s.183)

Komponenttien kustannukset tulevat ulkopuolisilta ostettavista komponenteista. Komponentteja ovat sekä standardiosat sekä erikseen valmistettavat räätälöidyt osat. Standardituotteet, joita ovat esimerkiksi moottorit, elektroniikka ja ruuvit ovat halvempia kuin räätälöidyt niin sanotut *kustomoidut* osat (engl. custom). Valmistuksessa onkin syytä miettiä onko kustomoitujen osien valmistaminen itse edullisempaa kuin niiden tilaaminen ulkopuoliselta. Asentamiseen liittyvät kustannukset muodostuvat pääosin työvoimakustannuksista. Asentamiseen saattaa liittyä työkalu-, tarvike- ja koneistuskustannuksia. Avustavan tuotannon kustannuksia ovat kaikki muut esiintyvät kustannukset. Kustannuksia tulee tavarankäsittelystä, laadunvalvonnasta, logistiikasta sekä kunnossapidosta. Nämä kustannukset eivät ole riippuvaisia tuotteen suunnittelusta ja ne koskevat kaikkia tuotettavia tavaroita, joten niitä voidaan pitää tehtaan kiinteinä kustannuksina. (Ulrich & Eppinger 1995, s.184-185)

Kustannusten jakaminen kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin on tapa tarkastella kustannuksia. Kiinteät kustannukset ovat kustannuksia, jotka muodostuvat valmistuksen tukitoiminnoista eivätkä siten ole riippuvaisia valmistusmäärästä. Muotista aiheutuneita kustannuksia voidaan pitää kiinteinä kustannuksina, jolloin kustannusten tarkastelu on helpompaa. Muotti ei kulu merkittävästi valettujen kappaleiden määrästä, vaikka toki muotti kuluu lopulta. Valumäärien pysyessä muutamasta kappaleesta tuhansiin ei esiinny muotin kulumista, joten kustannusta voidaan perustellusti pitää kiinteänä. Vaikka todellisuudessa mikään kustannus ei ole kiinteä, voidaan monet kustannukset käsitellä kiinteinä.

Muuttuvat kustannukset ovat sidoksissa valmistusmäärään. Näitä ovat esimerkiksi valmistusmateriaali ja valmistukseen käytetty energia. Työvoima on osaltaan muuttuva, mutta toisaalta kiinteä. Vuokratyövoiman käyttö on vienyt työvoimakustannuksia kiinteistä muuttuvien suuntaan. (Ulrich & Eppinger 1995, s.185-186)

The Bill of Materials (BOM) on tuotteen osalista, jota voidaan hyödyntää DFMA:n suunnittelussa. Listaa voidaan laajentaa siten että siinä esitetään komponenttiin kohdistuvat kustannukset. Kustannukset jaetaan vielä muuttuviin ja kiinteisiin. (Ulrich & Eppinger 1995, s.186-187)

Standardikomponenttien kohdalla vertailu on helppoa ja voidaan valita parhaiten halutut ominaisuudet täyttävä komponentti. Riittävän suurella erällä voidaan räätälöity komponentti hinnoitella standardikomponentiksi. Räätälöidyn komponentin hinta on valmistajan sanelema, ja sen kustannukset muodostuvat materiaaleista, valmistuksen kustannuksista ja katteesta. (Ulrich & Eppinger 1995, s.187-188)

Monen toiminnan komponenteilla voidaan vähentää kokoonpanon tarvetta. Yhdellä osalla voidaan saavuttaa tilansäästöä ja osa voi tulla jopa halvemmaksi kuin sen korvaamilla ominaisuuksilla varustetut osat.

Valmistettavuuden suunnittelu Corrado Polin mukaan

Corrado Polin DFMA teoria keskittyy sopivan toleranssin suunnitteluun. Metallirakenne, joka toteutetaan perinteisin työstömenetelmin, voidaan suunnitella jopa ilman tole-

ranssia. Kappaleiden kiinnittäminen toisiinsa hitsaamalla mahdollistaa pienien heittojen korjaamisen. Suunnittelussa kannattaa miettiä mitkä osuudet tarvitsevat toleranssiin työstämistä, mikä on usein kalliimpaa ja hitaampaa. Standardikomponenttien kohdalla on tiedossa kappaleiden kiinnityspisteet, joten suunnittelussa on huomioitava kiinnitys. Kiinnityksen suunnittelulla voidaan vähentää toleranssin tarkkuutta. Esimerkiksi läpipultti ei ole yhtä tarkka sijainnista kuin koneistettu kierre, jolloin myös valmistus on helpompaa. (Poli 2009, s. 13-17)

Poli jakaa kokoonpanoprosessin kahteen osaan, käsittelyyn (engl. handling) ja liittämiseen (engl. insertation). Kokoonpano voidaan toteuttaa joko ihmisvoimin tai automatisoidusti koneilla. Tuotetta piensarjatuotantona valmistettaessa on ainoa järkevä kokoonpanomuoto käsin kokoaminen, eli kokoonpano tapahtuu ihmisten toimesta eikä automatisoidusti. Polin mallin mukaisesti kokoaminen tapahtuisi omalla työpisteellään ja pulttien ja mutterien kiristäminen omalla asemallaan. Piensarjatuotannossa, jossa kokoonpantavana on mahdollisesti vain yksi tuote kerrallaan, on kokoonpano mahdollista suorittaa yhdessä paikassa. Osien yhteensovittamista voidaan helpottaa suunnittelemalla ne siten että ne ovat mahdollisuuksien rajoissa symmetrisiä, jolloin osa on aina oikein päin. Kosketuspinnat voidaan viistää siten että kappale keskittää itse itsensä ja kappaleet ovat tiiviisti toisiaan vasten, sillä tiukka sovite teräviin kulmiin voi ahdistaa asentaessa ja siten jäädä raolle liitoskohdasta. (Poli 2001, s.253-259)

2.3 Modulaarisuus

Modulaarisuudella on useita eri määritelmiä eri kirjallisuuslähteissä. Eri määrittelyissä on kuitenkin yhteisiä tekijöitä, joten niistä voidaan koota selkeä määritelmä. Modulaarinen tuote koostuu moduuleista, jotka toisiinsa kiinnitettäessä luovat kokonaisuuden, tuotteen. Moduulien toisiinsa liittäminen tapahtuu osissa olevien säännönmukaisuuksien avulla, josta käytetään tässä työssä Lehtosen käyttämää termiä rajapinta.

Komponentit, jotka pääosin ovat polkupyörien standardikomponentteja, voidaan ajatella moduuleina. Esimerkiksi kiekko on kokonaisuus, joka koostuu vannekehästä, pinnoista, navasta, rattaasta, jarrulevystä, vannenauhasta, sisäkumista ja ulkorenkaasta. Moduulin määritelmän mukaisesti sillä on oltava rajapinta ja sen on kuuluttava moduulijärjestelmään (Lehtonen). Kiekolla on selkeä rajapinta, joka on akselikiinnitys. Nojapyörä muodostaa kokonaisuutena moduulijärjestelmän, jolloin täytyy toinenkin ehto.

Moduuleista koostuvat rakenteet ovat toisiinsa yhteydessä rajapinnoista. Rajapintojen vakiointi ja määrittely ovat tärkeitä suunnittelussa. (Thomke) Rajapintojen suunnittelussa otetaan huomioon yleiset standardit, jotta kaupalliset osat ja itse valmistetut osat sopivat toisiinsa täydellisesti. Valmistettaessa kumpikin osa toisiinsa liitettävistä osista on standardin noudattaminen rajapintaa suunniteltaessa tärkeitä. Tällöin rajapinnan suunnittelu on jo valmiiksi suunniteltu, joten voidaan keskittyä itse moduulin suunnitteluun ja standardi mahdollistaa itse valmistetun osan vaihtamisen ulkopuolisen valmistajan vastaavaan osaan ilman yhteensopivuusongelmia.

Tässä projektissa rajapinnat ovat suurimmalta osin valmiiden moduulien eli komponenttien sanelemia. Valittujen komponenttien mukaisesti niille on valmistettava vastinkappaleet eli rajapinnat runko-osaan. Komponentista riippuen rajapintojen valmistuksessa on toleransseilla eroa. Hahlo, johon akseli kiinnitetään, ei vaadi yhtä tarkkaa työstöä kuin jarrusatulan kiinnityspisteiden sijoitus. Rajapinnat täytyy suunnitella tapauskohtaisesti. Komponentit ovat standardoituja, joten kinneriin tulevat rajapinnat ovat myös standardoituja ja moduuleita voi siten vapaasti valita omien tarpeiden mukaisesti.

Tässä työssä tuote, jota ollaan kehittämässä, pyritään suunnittelemaan ja kehittämään modulaarista ajattelua silmälläpitäen. Modulaarisuus ja vakiointi helpottavat DFMA:n mukaista suunnittelua, koska siten voidaan vähentää erilaisten osien määrää, jolloin valmistettavuus paranee.

Pahlin ja Beitzin koneensuunnittelun oppikirjassa sekä VDI-2221 metodin mukaisessa tuotekehitysprosessissa on viitteitä modulaariseen ajatteluun. Moduulijärjestelmä on koneiden, rakenneryhmien ja yksittäisosien kokoelma, jonka jäsenet eli moduulit toimivat erilaisia ratkaisuja edustavina rakennuspaloina, joita yhdistelemällä voidaan toteuttaa erilaisia kokonaistoimintoja (Pahl & Beitz, s. 436).

Modulointi on täten keskeinen tekijä ajateltaessa sarjavalmisteisia tuotteita. Teollisessa valmistuksessa modulaarisella rakenteella voidaan tuotteen valmistuksessa säästää aikaa sekä kustannuksia, ja samalla voidaan ylläpitää laajaa tuoteskaalaa.

3 VALMISTUSTEKNISET MENETELMÄT

Valmistustekniikoiden teorioista käsitellään tuotekehityksen ja ”Hands on Engineering”-tekniikan kannalta olennaiset teoriat. Prototyyppiä rakennettaessa osa valmistusmenetelmistä sivuutetaan, koska ne eivät liity olennaisesti tuotekehitykseen tai prototypointiin.

3.1 Putken taivutus

Tässä työssä keskitytään putken taivuttamiseen koneellisesti. Putkentaivutuskone voi olla joko manuaalinen lihasvoimalla toimiva tai konevoimalla toimiva. Kummallakin tavalla toteutetut taivutuskoneet toimivat saman periaatteen mukaisesti. Putki taivutetaan lestiä vasten, joka sanelee taivutuksen säteen. Lesti on usein neljäsosaympyrän muotoinen puoliympyrän muotoisella uralla varustettu osa. Lestejä on erikokoisia ja jotkut niistä ovat yli puoliympyrän muotoisia, jolloin niillä voidaan valmistaa yli 180 asteen kulmia. Lesti valitaan taivutettavan putken mukaan, jolloin lestin uran halkaisija on sama kuin taivutettavan putken. Putkea taivutetaan kerrallaan haluttu kulma, minkä maksimiaste on koneesta ja lestistä riippuvainen. Esimerkiksi neljäsosan muotoinen lesti tarvitsee kaksi taivutusta, jotta saavutetaan 180 asteen kulma. (Autio 1992, s. 162-166)

Usein koneissa on luisti, joka liukuu putken pintaa pitkin taivuttaen samalla putkea. Luisti on usein valmistettu luistavasta metallista, kuten messingistä, jotta se luistaisi putken pinnalla mahdollisimman hyvin. Luistin ansiosta putkeen ei kohdistu suurta muodonmuutosta vaan putki pysyy mahdollisimman pyöreänä. (Autio 1992, s.162-166)

Putkea taivutettaessa siihen kohdistuu rasituksia. Sisäkaarteessa on puristusjännitys ja ulkokaarteessa vetojännitys. Taivutussädettä pienennettäessä saattaa ulkokaarten venymäjännitys nousta liian suureksi. Tämä sanelee kuinka pienellä säteellä putkea on parasta taivuttaa. Taivutussädettä voidaan arvioida seuraavalla kaavalla (Röytiö & Söderberg 1993, s. 37)

$$R = \frac{D}{A_s} \quad (1)$$

jossa R on saavutettava keskitaivutussäde (mm)

D on putken halkaisija (mm)

A on vetokokeen ilmoittama murtovenymä (%)

Kaavasta voidaan yleistää, että taivutussäteen olisi oltava vähintään kaksi kertaa putken halkaisija. Putkea taivutettaessa esiintyy aina takaisinjousto, jonka määrä on parasta todeta kokeilemalla. Esimerkiksi jos takaisinjousto on asteen verran ja putki halutaan taivuttaa 90 asteen kulmaan olisi taivutuksen oltava 91 astetta.

Putkia voidaan taivuttaa myös rypyttämällä, jolloin putken taivutuksenpuoleista reuna kuumennetaan, jotta taivutettaessa muodostuu pullistuma. Pullistuman määrällä ja koolla säädellään putken taipuma. Menetelmä ei sovellu tähän työhön, koska se estäisi laakerien pujottamisen kampiakseliin. (Autio 1992, s.165)

3.2 Hitsaus

Standardi SFS 3052 määrittelee hitsausliitoksen seuraavasti: *”Hitsausliitos syntyy, kun kaksi tai useampia työkappaleita liitetään hitsaamalla yhteen”* sekä *”Hitsaus on osien liittämistä toisiinsa käyttämällä hyväksi lämpöä ja/tai puristusta siten, että osat muodostavat jatkuvan yhteyden. Hitsauksessa voidaan käyttää apuna hitsausaineita”* (SFS 3052 1995)

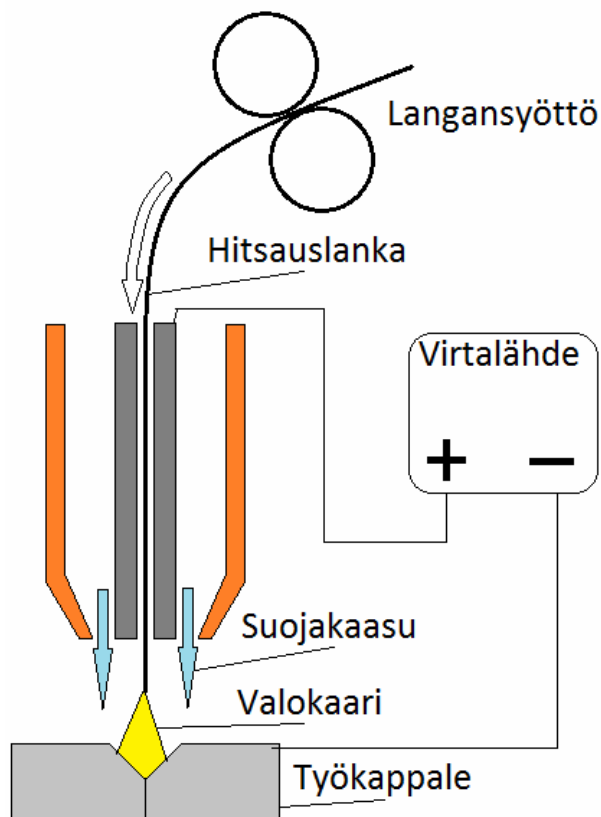
Hitsatessa kaksi kappaletta liitetään toisiinsa. Liittäminen tapahtuu tietynlaisen liitoksen mukaisesti. Liitostyypit voidaan jakaa summittaisesti neljään kategoriaan. Liitostyyppejä ovat päittäis-, nurkka-, kulma- ja päällekkäisliitokset. Päittäisliitoksessa kappaleet liitetään toisiinsa kiinni päistään suoraan. Nurkkaliitoksessa kappaleet muodostavat kulman liitoksesta, tavallisesti 90 asteen. Kulmaliitoksessa kappale liitetään toiseen siten että toisen pääty liitetään toisen kappaleen kylkeen. 90 asteen kulmassa olevasta kulmaliitoksesta käytetään nimitystä T-liitos. Päällekkäisliitoksessa kappaleet liitetään toisiinsa päällekkäin. Liitoksesta käytetään nimitystä hitsausliitos eikä esimerkiksi hitsiliitos. (Airila et al. 1997, s. 244)

Hitsausliitoksen yhteydessä käytettävää termistöä ovat hitsi ja railo. Hitsi tarkoittaa ainesta, joka hitsauksen yhteydessä on sulana, eli materiaalia, joka sulaa hitsauksessa sekä hitsausainetta. Hitsausainetta ovat hitsauspuikot sekä lisäainelanka. Railo on hitsattavien osien välinen tila. (Airila et al. 1997; Lepola & Makkonen 2005)

Hitsausprosessit jaetaan sulahitsaukseen ja puristushitsaukseen. Sulahitsauksessa hitsattavien kappaleiden liitoskohdat kuumennetaan lämpötilaan, jossa ne sulavat, jolloin kappaleet sulavat yhteen. Puristushitsauksessa kappaleet puristetaan toisiinsa kiinni ja puristuskohda kuumennetaan, jolloin kappaleet tarttuvat siitä toisiinsa. Puristushitsauksessa ei käytetä lisäainetta. (Lepola & Makkonen 2005, s.8-9)

Tässä työssä keskitytään MIG/MAG-hitsaukseen, koska käytettävät hitsauslaitteet prototypoinnissa ja tuotteen valmistuksessa ovat kyseiset. Metal-arc inert gas welding (MIG) sekä Metal-arc active gas welding (MAG) hitsausprosesseilla tarkoitetaan metallikaasukaarihitsausta. Prosessien erotuksena on käytettävän suojakaasu, joka määräytyy hitsattavan metallin mukaan. Prosessissa valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä hitsauslangan ja työkappaleen välillä. Hitsauskone syöttää hitsauslankaa, josta sula metalli

siirtyy pisaroina hitsisulaan. Valokaari syntyy hitsauslangan koskiessa työkappaleeseen, jolloin aikaansaadaan oikosulku joka sulattaa hitsauslangan. (Lukkari 2002)



Kuva 3.1. Valokaaren muodostus MIG/MAG-hitsausprosessissa.

MIG/MAG-hitsaus on osittain mekanisoitua hitsausta. Hitsauslangan ulossyöttö hitsauspistoolista tapahtuu koneellisesti, mutta pistoolin kuljetus tapahtuu hitsaajan liikkeenä. Prosessi on helppo automatisoida robotille, joka liikuttaa pistoolia automatisoiden hitsaustapahtuman. (Lukkari 2002)

MIG/MAG-hitsaus on monipuolinen prosessi, koska siinä voidaan erilaisista kaarityypeistä valita hitsaukseen parhaiten sopiva. Kaarityyppejä on kolme erilaista: lyhytkaarihitsaus, sekakaarihitsaus ja kuumakaarihitsaus. Virta ja jännitearvot ovat kaarityypeissä kasvavia lyhytkaarihitsauksesta mentäessä kuumakaarihitsaukseen. Vastaavasti myös hitsattavien kappaleiden paksuudet kasvavat samassa suhteessa. (Lukkari 2002)

3.3 Lujuustarkastelu

Tässä työssä lujuustarkastelut suoritetaan mallinnuksen yhteydessä käyttämällä SolidWorks mallinnusohjelmiston FEM osiota SolidWorks Simulation. FEM (Finite Element Method) menetelmä on yleisesti käytössä analyyttisen lujuuslaskennan tukena (CAD-Works).

SolidWorks Simulation -elementtimenetelmällä tarkastelu on jaettu kolmeen tapaukseen: sauvoihin, joilla on yksi vapausaste, tasoihin joilla on kaksi vapausastetta sekä

kolmen vapausasteen kappaleisiin, jotka voivat olla muodoltaan hyvinkin vapaita. (Shih)

Kappaleille luodaan elementtiverkko (engl. mesh), joka koostuu SolidWorksin tapauksessa tasolla kolmioista ja 3d-kappaleilla tetraedreistä. Elementtiverkon tarkkuutta säätelemällä voidaan säädellä laskennan tarkkuutta. Harvempaa verkkoa käytettäessä laskutoimitus on nopeampi, eikä se vaadi konetehoa yhtä paljon kuin verrattaessa tiheämpään verkkoon, jolloin myös laskentatarkkuus paranee.

Mallinnettavia kappaleita joudutaan usein yksinkertaistamaan ja kokoonpanoja jakamaan pienempiin osakokoonpanoihin, jotta ohjelma kykenee suorittamaan laskennan. Esimerkiksi rakenne, joka koostuu pyöreistä ohutseinäisistä putkista, on erittäin haasteellinen SolidWork Simulation -laskennalle. Yksinkertaistamisessa on hyvä käyttää apuna symmetriatasoja sekä poistaa monimutkaisia muotoja. Kuormitukset muutetaan voimiksi, jotka vastaavat niitä parhaiten.

4 NOJAPYÖRÄN TUOTEKEHITYSPROSESSI

Tässä työssä tuotekehitysprosessi toteutetaan suurelta osin Pahlin ja Beitzin systemaattisen tuotekehitysmenetelmän VDI-2221 mukaisesti. Muista tuotekehitysmenetelmistä käytetään parhaiten kehitysprosessia tukevia menetelmiä.

4.1 Tehtävän selvitys

Tässä työssä tehtävän selvittely aloitettiin tutustumalla olemassa oleviin ratkaisuihin, niin kaupallisiin kuin harrastajien itse rakentamiinkin. Kehitettävä tuote haluttiin toteuttaa siten, että sillä voi ajaa vaikka olisi huono tasapaino. Tällöin rakenteesta tulee vähintään kolmirenkainen. Olemassa olevat ratkaisut kolmirenkaisesta rakenteesta voidaan jakaa kahteen tapaan toteuttaa rakenne. Nojapyörää, jossa on kaksi pyörää takana ja yksi edessä, kutsutaan deltaksi. Toinen tapa on sijoittaa kaksi pyörää eteen ja yksi taakse, jolloin puhutaan nuijapäämuodosta.



Kuva 4.1. Vasemmalla on delta ja oikealla nuijapää. (Haselbikes, Hpvelotechnic)

Voimansiirto on toteutettu ketjuvedolla keskirunkoa pitkin, josta voima jaetaan kahden vetävän pyörän rakenteessa akselilla vetäville pyörille. Tässä työssä haluttiin kokeilla toisenlaista ratkaisua, jossa ketjuveto johdettaisiin sivusta, jolloin runkokin voitaisiin suunnitella ilman keskirunkoa. Harrastelijoiden keskuudessa on esiintynyt perinteisen kampirakenteen muuttamista kampiakselin tyyliseksi ratkaisuksi, minkä kokeileminen soveltuu hyvin tähän työhön, sillä tässä kehitysprojektissa pyritään kokeilemaan mahdollisimman monia uusia ideoita.

Tuotteelle halutaan mahdollisimman laaja käytettävyys, joten sillä on kyettävä ajamaan myös kaupunkiympäristössä, mikä asettaa kääntösäteelle tulee omat vaatimuksensa. Tuotteen säilytyksen kannalta sen ulkomitat eivät saa olla liian suuret, jotta se mahtuu varaston ovesta eikä muutenkaan vaatisi kohtuuttomasti säilytystilaa. Modulaarinen

rakenne mahdollistaa tuotteen säilyttämisen ja kuljetuksen osissa. Myös mahdollinen sarjavalmistus ja jälleenmyynti helpottuvat modulaarisen rakenteen ansiosta.

Tuotteelle ei ole varsinaisesti olemassa olevaa asiakassegmenttiä, joten Wrightin asiakaslähtöinen suunnittelu ei tuo lisäarvoa tuotekehitysprosessille. Wrightin teorian mukainen valmistuksen huomioonottaminen on mukana projektissa, jotta tuotteen valmistettavuus on mahdollista.

Taulukko 4.1. Vaatimuslista

	Vaatimuslista <i>Nojapyörä</i>	1.11.2012
Vaatus (V) /Toive (T)	Vaatimukset	Vastaava
V	Kolmipyöräinen rakenne	
V	Voimansiirto kampiakselilla	
V	Kaupunkikäyttöön soveltuva kääntösäde, noin 4m	
V	Modulaarinen rakenne	
T	Ulkoiset mitat: pituus 1,7m leveys 0,7m	
T	Kevyt rakenne, paino alle 15kg	

4.2 Luonnostelu

Luonnosteluvaiheessa vaatimuslistan pohjalta muodostetaan tuotteesta konsepti. Tämä työvaihe toteutetaan kolmen työaskeleen avulla. Nämä askeleet ovat abstrahointi, toimintorakenteen laadinta ja vaikutusperiaatteiden etsintä.

Abstrahoinnin tarkoituksena on muodostaa vaatimuslistan pohjalta lausemuotoinen ongelma, jota ratkaistaan. Abstrahointi suoritetaan viidellä askeleella, jotka ovat seuraavat.

1) Jätetään ajatuksissa toivomukset pois. Tässä projektissa se tarkoittaa sitä että vaatimuslistalla olevat toivomukset ulkoisten mittojen ja painon suhteen jätetään taustalle.

2) Jätetään pois vaatimukset, jotka eivät ole oleellisia. Tässä projektissa kaikkia vaatimuksia voidaan pitää oleellisina, joten askel ei vaikuta vaatimuksiin.

3) Muutetaan määrälliset toteamukset laadullisiksi. Vaatimuslistassa vaatimukset ovat jo valmiina suurimmaksi osaksi laadullisia. Kääntösäteen vaatimus muutetaan muotoon käännettävissä kevyen liikenteen väylällä.

4) Laajennetaan mielekkäästi tähän asti tunnettua. Tämän vaiheen tarkoituksena olisi yhdistellä vaatimuksia, mutta tässä työssä jäljellä olevat 4 kappaletta eivät ole yhdisteltävissä.

5) Muotoillaan ongelma ratkaisuun nähden neutraalisti. Jäljellä ovat vaatimukset: kolmipyöräinen, voimansiirto kampiakselilla, käännettävissä kevyen liikenteen väylällä ja modulaarinen rakenne. Näistä vaatimuksista muodostetaan lause, joka kuvaa vaatimuksia, jotka kehitettävä tuote täyttää. Lause on siten muotoa: *Kolmipyöräinen urbaanin ympäristön nojapyörä kampiakselivoimansiirrolla modulaarisesti toteutettuna.*

Toimintarakenne tarkoittaa toiminnon pilkkomista kaavioksi, josta selviää tuotteen toiminnot. Tässä työssä kehitettävän tuotteen toiminnot voidaan jakaa ihmisen tuottaman voiman muuttamiseksi liikkeeksi ja matkan kulkemiseksi pisteestä a pisteeseen b.



Kuva 4.2. Voiman kulku esitettynä vuokaaviossa.

Kuljettaja tuottaa polkemalla voiman joka on siirrettävä pyörän avulla tiehen, jotta aikaan saadaan liike. Kampiakseli on haluttu rakenne, sillä se mahdollistaa ketjuvedon siirtämisen rungon reunalle. Lisäksi tämä rakenne on harvinainen, mikä sopii hyvin yhteen työn tavoitteena olevan uusien ratkaisujen kehittämisen kanssa. Kampiakseli välittää kammen pyörimisen ketjua pitkin vetävälle pyörälle. Pyörän pyöriessä sen kehänopeus muodostaa renkaan ja tien pinnan kitkan avulla lineaarisen liikkeen.



Kuva 4.3. Pyöräillä ajo esitettynä hyvin pelkistetyssä vuokaaviossa.

Pyörällä ajaminen voidaan esittää pelkistetyimmillään kolmessa tapahtumassa. Ensimmäisenä lähdetään liikkeelle, sitten tapahtuu varsinainen polkeminen ja eteneminen ja lopuksi prosessi lopetetaan ja nouseaan pois kulkuneuvosta. Jokainen tapahtumista on jaettava osatoiminnoiksi, jotta niihin voidaan perehtyä paremmin.

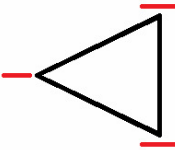
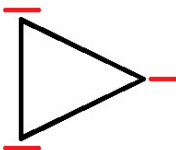
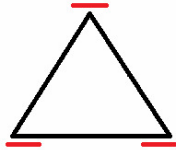










Liikkeellelähtö voidaan ajatella alkavaksi matka päätöksestä, tässä työssä kuitenkin aloitetaan kulkuneuvon nousemisesta. Kulkuneuvon nousemisen on oltava mahdollisimman vaivatonta. Kolmipyöräisen rakenteen ansiosta nojapyörä pysyy pystyssä paikallaan ollessaan, joten kuljettaja voi istua paikalleen ja aloittaa polkemisen ilman alkuvauhtia pelkäämättä tasapainon menettämistä.

Liikevaiheessa nojapyörällä pitää voida ajaa kevyen liikenteen väylällä, joten ohjattavuuden ja hallittavuuden on oltava helppoa. Laitteella pitää pystyä kääntymään risteyksissä 90 asteen kulmassa ja u-käännöksen on onnistuttava kevyen liikenteen väylällä. U-käännöksen ei tarvitse olla yhtenäinen liike, vaan eteen-taakse-liikettä voi esiintyä muutaman kerran. Laitteen hallittavuuden on oltava erinomainen jo turvallisuudenkin takia. Laitteella on pystyttävä pysähtymään riittävän lyhyellä jarrutusmatkalla. Laite ei myöskään saa kaatua missään olosuhteissa.

Pysähtymisvaiheessa matkanteko lopetetaan ja laitteen kyydistä nouseaan pois. Tasapainossa paikallaan olemisen mahdollistava rakenne helpottaa pois nousemista. Laitteen olisi syytä olla sen verran pieni että sen voisi jättää helposti parkkiin. Tarvitaan myös jonkinlainen seisontajarru, jottei laite lähde liikkeelle itsestään ja aiheuta siten vahinkoa tai vaaratilannetta.

Osatoiminnoille etsitään vaikutusperiaatteita, jotka saavat aikaan halutun toiminnon. Vaikutusperiaatteiden avulla pyritään kehittämään haluttuja ominaisuuksia. Vaikutusperiaatteita mietittäessä olisi syytä unohtaa valmis tuote ja miettiä vain toiminnon toteutavia vaihtoehtoja. Tällöin saadaan vaihtoehtoja, jotka eivät ole toteutettavissa, mutta tästä ei ole haittaa, sillä tällä menetelmällä kaikki mahdolliset tavat tulee käytyä läpi vähintään ajatustasolla.

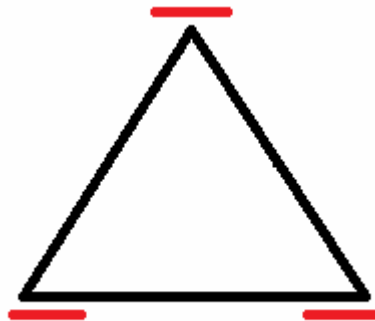
Taulukko 4.2. Morfologinen matriisi osatoimintojen vaikutusperiaatteista.

Osatoiminto	Vaikutusperiaatteet		
Pyörien sijoittaminen	 Nuijapää	 Delta	 2-Raiteinen
Kääntyvän pyörän sijainti	 Edessä	 Takana	 Jotain uutta?
Voimansiirto	 Takaveto	 Etuveto	
Ohjaustangon sijainti	 Ylhäällä	 Alhaalla	
Säilytys	 Pystyssä	 Osissa	 Ei huomioitu

Morfologisessa matriisissa on esitetty erilaisiin osatoimintoihin liittyviä vaikutusperiaatteita. Osatoiminnoista jotkut ovat toisiinsa yhteydessä ja siten valittu vaikutusperiaate vaikuttaa myös toisen toiminnan vaikutuksen valintaan. Voimansiirto ja kääntyvän pyörän sijainti ovat tällaisia, kun taas voimansiirron vaikutusperiaatteella ei ole yhtäläisyyttä säilytysratkaisun vaikutusperiaatteen valitsemisen kanssa.

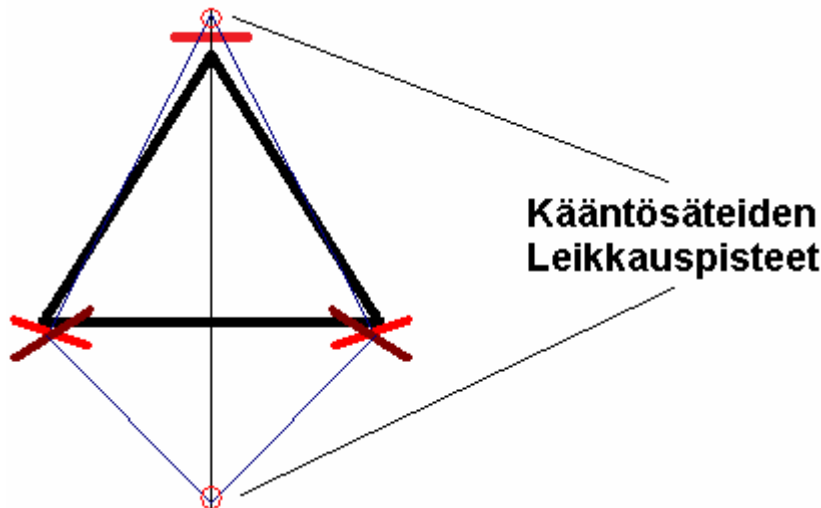
Vaikutusperiaatteen valinta tehdään osatoiminto kerrallaan, jolloin myös vaikutusperiaatteita esitellään tarkemmin. Tällainen tarkastelu helpottaa valintaa, koska näin jokainen vaihtoehto perustellaan ja niiden hyvät ja huonot puolet tulevat esiin. Tämän projektin osalta valitun ratkaisun on sovelluttava projektin tarkoitukseen, joka on yhtäläillä tuotteen kehitys kuin uusien ideoiden keksiminen ja kokeilu.

Pyörien sijoittelu on ensimmäinen tarkasteltava kohta matriisissa. Valmiit ratkaisut ovat delta ja nuijapää. Delta-mallissa nojapyörässä kuljettajan painopiste sijaitsee lähempänä vetäviä pyöriä kuin ohjaavaa etupyörää. Näin saadaan aikaan parempi pito, jolloin voimansiirto on tehokkaampaa. Nuijapää-mallissa kuljettajan painopiste sijaitsee lähempänä ohjaavia etupyöriä, joten sillä on vaikutusta ohjattavuuteen voimansiirron kustannuksella. Kolmas vaihtoehto on kaksiraiteinen rakenne, jossa toiselle puolelle sijoitetaan kaksi pyörää ja toiselle yksi. Tällaista, katamaraania sekä sivuvaunumoottori-pyörää muistuttavaa rakennetta ei esiinny kaupallisissa nojapyörissä. Kaksiraiteisen rakenteen hyvät ja huonot puolet eivät rakenteen harvinaisuudesta johtuen ole tiedossa, vaan ne täytyisi selvittää kokeellisin metodein. Tieteellinen tutkimus on oiva ympäristö kokeellisille metodeille, joten kaksiraiteinen rakenne on optimaalisin valinta pyörien sijoitusmuodoksi tässä tapauksessa.



Kuva 4.4. Pyörien sijoitus pelkistetyssä kaksiraiteisessa rakenteessa.

Kääntyvien pyörien sijainti on seuraava ratkaistava osatoiminto. Olemassa olevissa ratkaisussa, delta ja nuijapää, kummassakin ohjaus sijaitsee edessä ja veto on takana. Nojapyörissä, joissa kääntyvä pyörä on sijoitettu taakse, tapahtuu kääntämisen yhteydessä kulkuneuvon liikkumista sivuttain kuljettajan pään takana, mikä usein tuntuu epämiellyttävältä, joten kääntyvä pyörä olisi hyvä sijoittaa silmien etupuolelle. Kaksiraiteinen rakenne mahdollistaa kääntyvän pyörän sijoittamisen sekä eteen että taakse, mutta kääntyvää pyörää ei kuitenkaan voida sijoittaa sille puolelle, jolle sijoitetaan vain yksi pyörä. Jos peräkkäiset pyörät ovat kiinteät, ei sivussa oleva pyörä muodosta kääntösädettä niiden akselien suhteen, joten laite ei reagoi pyörän kääntämiseen. Myöskään kahden pyörän puolelle, joko etu- tai takapyöräksi sijoitettu kääntyvä pyörä ei saa laitetta kääntymään tarpeeksi hyvin, jotta ohjattavuus olisi tarpeeksi hyvä kevyen liikenteen väylälle. Ainoaksi vaihtoehdoksi jää siten se, että kääntyviä pyöriä tarvitaan kaksi. Kääntyviksi pyöriksi on tehtävä kahden pyörän puolen kummatkin pyörät. Kummankin pyörän ei tarvitse välttämättä olla ohjattava, vaan toinen pyörästä voi olla ”kelluva”, jolloin se on nivelletty siten että sen on mahdollista kääntyä vapaasti ohjauksesta, jolloin kääntösäde muodostuu yksittäisen puolen pyörän akselin suuntaisesti.



Kuva 4.5. Teoreettisen kääntösäteen muodostuminen paikallaan pysyvän pyörän akselille.

Voimansiirto ottaa kantaa siihen onko laitteessa etu- vai takaveto. Edellisen kohdan perusteella vetäväksi pyöräksi muodostuu kaksiraiteisen rakenteen mukaisesti yksittäinen pyörä. Tämä ratkaisu on perusteltavissa sillä että kääntyviksi pyöräksi on valittava kahden pyörän puoli, sekä sillä että tällä tavoin kuljettajan painojakaumasta 50 prosenttia kohdistuu vetävälle pyörälle, mikä varmistaa parhaan mahdollisen pidon. Painopisteen pitää sijaita lähellä vetävän pyörän akselia, jotta 50 % painojakauma toteutuisi. Pyörän pitäisi sijaita kuitenkin silmien edessä, koska kääntösäde on sen akselin suuntainen. Ihmisen painopiste sijaitsee yleensä lähellä napaa, joten selinmakuulla ihmisen painopiste on silmien etupuolella. Tässä tapauksessa ei voida siten varsinaisesti puhua etu- eikä takavetoisesta laitteesta, vaan keskimäinen pyörä on vetävä pyörä.

Ohjaustangon sijainti on kaupallisissa nojapyörissä joko perinteisten pystypyörien tapaan istuimen yläpuolella tai vaihtoehtoisesti istuimen alapuolella. Tässä projektissa kääntyvä pyörä sijaitsee kuljettajan toisella puolella, joten ohjaustankoa ei kannata tuoda ylhäältä ja keskeltä, mikä olisi järkevää jos kääntyvä pyörä sijaitsisi edessä ja keskellä kuten delta-mallissa. Ohjausvarsi ja varsinainen ohjaustanko olisikin mahdollista tuoda rungon mukaisesti sivulta. Ohjaus voidaan suunnitella tarkemmin vasta rungon suunnittelun yhteydessä ja ohjaustangon sijainti määräytyy tarkemmin vasta tässä vaiheessa.

Säilytys tarkoittaa tässä yhteydessä, ei pelkästään laitteen säilytystä, vaan myös valmistusta ja tuotteistamista. Oletetaan että tuotteelle olisi kaupallista potentiaalia ja sitä valmistettaisiin sarjatuotantona, jolloin logistisilla ominaisuuksilla on suuri merkitys. Modulaarinen ajattelu on tämän tuotteen kehityksessä oleellisesti mukana, minkä vuoksi tuotteen on oltava osista koostuva, jopa rungon osalta, jolloin myös säilytystä mietittäessä osiin purkaminen edesauttaa tilan löytymistä. Esimerkiksi jos pyörällä ei ajeta talvikautena, olisi hyvä että tuotteen saisi pienempään tilaan kuin ajokunnossa ollessaan. Runko olisi hyvä suunnitella siten, että laite olisi mahdollista parkkeerata pysyvästi, jolloin se veisi lattiapinta-alaa huomattavasti vähemmän. Oletetaan että laite vie

pinta-alaa ajokuntoisena 2 neliometriä, mutta pystyyn käännettäessä vain puoli neliometriä, jolloin tilansäästö olisi 75 %, mikä on huomattavasti vähemmän kuin tavallisen polkupyörän vaatima lattiapinta-ala. Toisaalta talven ajaksi osiin purettava tuote olisi helppo viedä varastoon säilytykseen.

Konseptin muodostamiseksi ei tarvita erillistä pisteytystä arviointikriteerejä varten, koska vaihtoehtoja jokaiselle osatoiminnoille oli vähän. Osatoiminnoille voitiin valita paras vaikutusperiaate pelkästään perusteluiden perusteella, joten valintaa ei tarvinnut tehdä pisteytyksen kautta. Konseptiksi muodostui kaksiraiteinen, mahdollisesti kahden pyörän ohjauksella toteutettu kulkuneuvo, jossa voimansiirto toteutetaan kampiakselin avulla yksittäiselle pyörälle, jolle pyritään saamaan mahdollisimman paljon kuljettajan painon kuormituksesta. Rakenne toteutetaan modulaarisesti.

4.3 Kehittely

Kehittelyvaiheessa konseptista muodostetaan lopullinen kehitelmä. Tämä vaihe toteutetaan kehittelyn työaskelia apuna käyttäen. Työaskelia on yhteensä 15 kappaletta, joista kaikkia ei kuitenkaan tarvitse välttämättä käyttää, vaan käytettävät askeleet määräytyvät pitkälti kehitettävän tuotteen mukaan.

Kehittely aloitetaan vaatimuslistan tarkastelulla, jolloin siinä olevat muotoon ja rakenteeseen vaikuttavat numeeriset arvot otetaan huomioon. Nämä arvot antavat kehitettävälle tuotteelle tarvittavat apumitat. Tässä työssä mitat ovat toiveita ja vaatimus kolmipyöräisestä rakenteesta on ainoa selkeä numeroarvo. Toiveena olevat mitat koon ja painon suhteen ovat hyvät lähtöarvot joita tavoitellaan.

Rakennemuotoilun kannalta tässä työssä kehitettävä tuote jaetaan moduuleihin, joita kutakin kehitetään omana kokonaisuutenaan. Moduulit voidaan jakaa karkeasti ottaen kahteen kategoriaan: itse valmistettavat ja valmiit komponentit. Itse valmistettaviin osiin kuuluvat laitteen runko sekä osa voimansiirron komponenteista. Runko voidaan edelleen jakaa pienempiin kokonaisuuksiin, joita ovat voimansiirto ja vetävä pyörä, ohjauslaitteisto sekä loppuosa rungosta, mukaanlukien istuin sekä tavarankuljetustila. Moduulien kehittäminen esitellään luvussa 5. Moduulien kehittäminen on jaettu kolmeen osaan, jotka ovat voimansiirto, rungon kehitys sekä komponenttien valinta.

4.4 Viimeistely

Tässä työssä itse valmistettavista osista luodaan konepiirustukset, joiden mukaan osat voidaan valmistaa. Työvaiheet dokumentoidaan osana tätä diplomityötä.

5 NOJAPYÖRÄN MODUULIEN KEHITYS

Nojapyörän kehittämisprosessi jaettiin osakokonaisuuksiin. Tällä tavalla kehitettäessä rakenteesta saadaan modulaarinen. Seuraavassa nojapyörän kehitystyötä käsitellään kolmen eri tekijän kautta, jotka ovat voimansiirto, runko ja komponentit. Voimansiirto ja runko on suunniteltava itse, mutta komponentit ovat standardiosia.

5.1 Voimansiirto

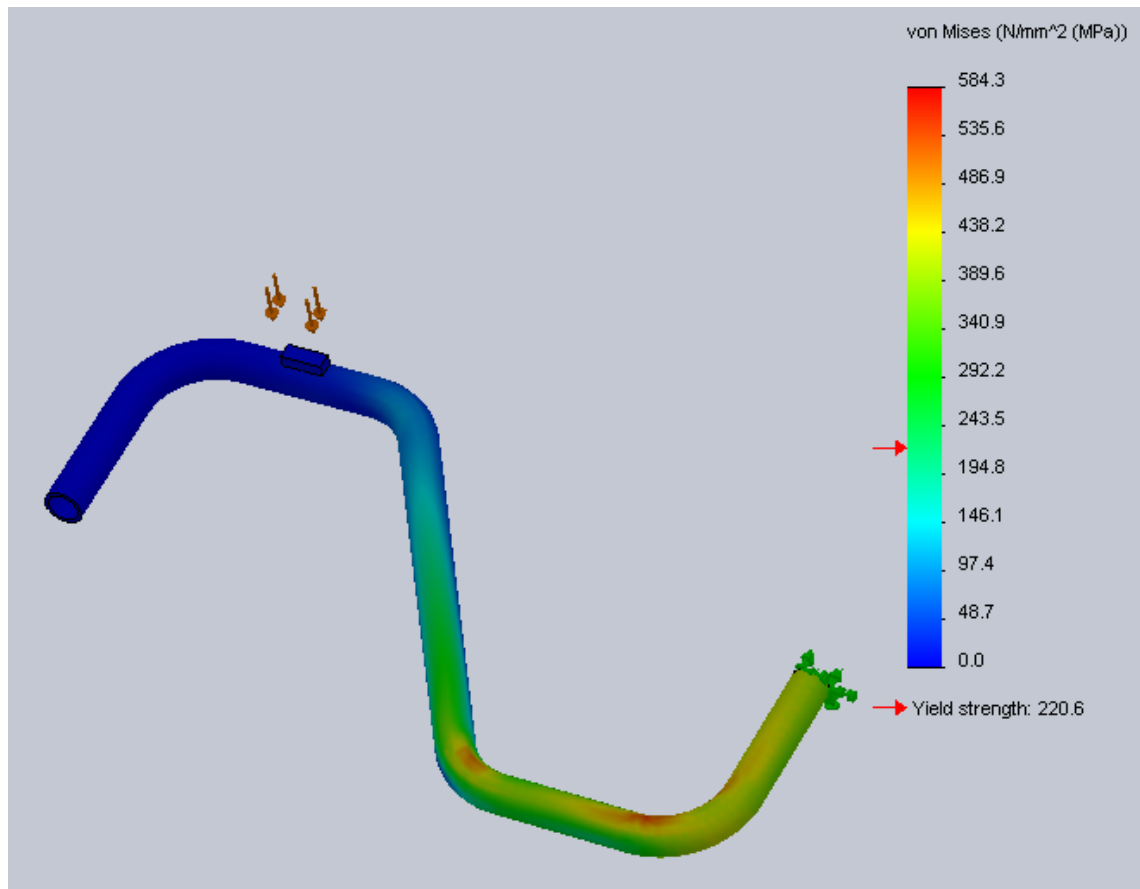
Voimansiirto sijaitsee rungon sivulla, jolloin keskelle saadaan tilaa. Voimansiirto toteutetaan tavanomaisista polkupyörien kammista poiketen kampiakselimaisella ratkaisulla, jolloin ketjulinja siirtyy kampien välistä akselin päähän. Kun keskelle ei tule runkoa, jää jaloille polkemista varten enemmän tilaa liikkua ja nojapyörään noustessa voidaan astua laitteen sisälle.

5.1.1. Kampiakseli

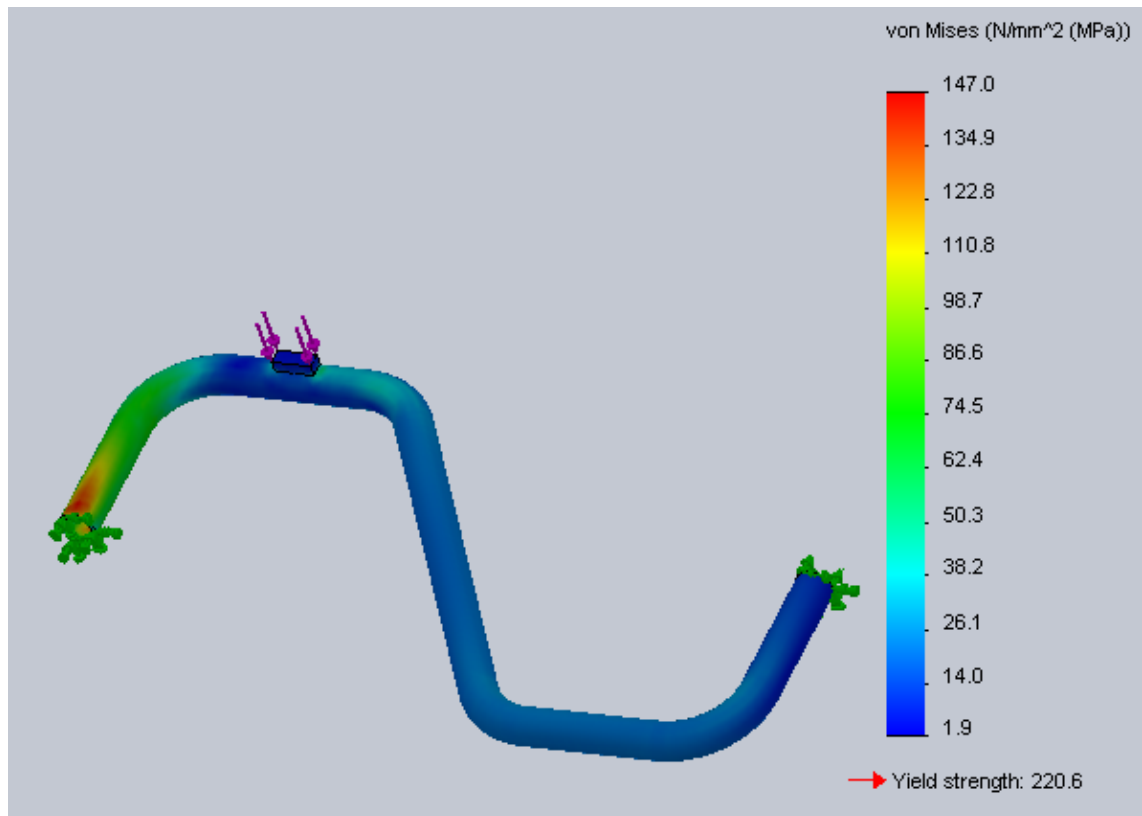
Perinteisesti polkupyörien kammet on toteutettu keskeltä laakeroidusti siten että keskellä on keskiölaakerit joista lähtevät kammet. Rakenne on paras mahdollinen kun kyseessä on kaksipyöräinen polkupyörä, oli kyseessä sitten pysty- tai nojapyörä. Pyörien lukumäärän lisääntyessä keskirunko, jonka perinteinen kampiratkaisu vaati, ei välttämättä ole optimaalisin ratkaisu. Kampiakseliratkaisua ja perinteistä ratkaisua vertailtaessa laakerien sijainti muuttuu keskeltä reunalle, jolloin myös laakerien kuormitus muuttuu laakerien etäisyyden muuttuessa. Keskiöön kohdistuvaa voimaa voidaan luonnehtia leikkaavaksi, koska laakerit ovat lähellä toisiaan ja kammien etäisyys laakerista on lyhyt. Pyöräilijän painopiste sijaitsee akselin suuntaisesti lähellä akselin keskipistettä. Lähellä olevat laakerit eivät muodosta tukivoimia yhtä paljon kuin kauemmaksi toisistaan sijoitetut laakerit. Polkupyörävalmistajat ovat ryhtyneet käyttämään rungon ulkopuolelle sijoitettavia ulkoisia keskiölaakereita, joilla laakerien etäisyyttä toisistaan voidaan kasvattaa suurempien tukivoimien toivossa.

Kampiakselisysteemillä saadaan aikaan pitkä etäisyys laakerien välille. Etäisyyksien kasvaessa myös momentit kasvavat suhteessa. Kampiakselisysteemillä polkuvoimat kohdistuvat akselin keskelle ja laakerien tukivoimat sijaitsevat akselin reunoilla. Polkuvoimasta muodostuva momentti otetaan vastaan akselin kummastakin päästä, jolloin rakennelma kestää suuriakin momenteja. Kampiakselisysteemin rasitus vaikuttaakin suuremmassa määrin taivuttavana voimana akselille kun laakereihin.

Keskiösystemillä ja kampiakselisysteemillä ei ole kovinkaan suurta painoeroa. Kampiakselisysteemit ovat vielä harvinaisia, eivätkä sitä tässä työssä kehitetyllä tavalla ole toteuttaneet muut, joten ratkaisun kestävyyttä ei voida todentaa pitkäaikaisen kesto-testin perusteella. Perinteisten keskiölaakerien käyttöikä on noin 5000 km.

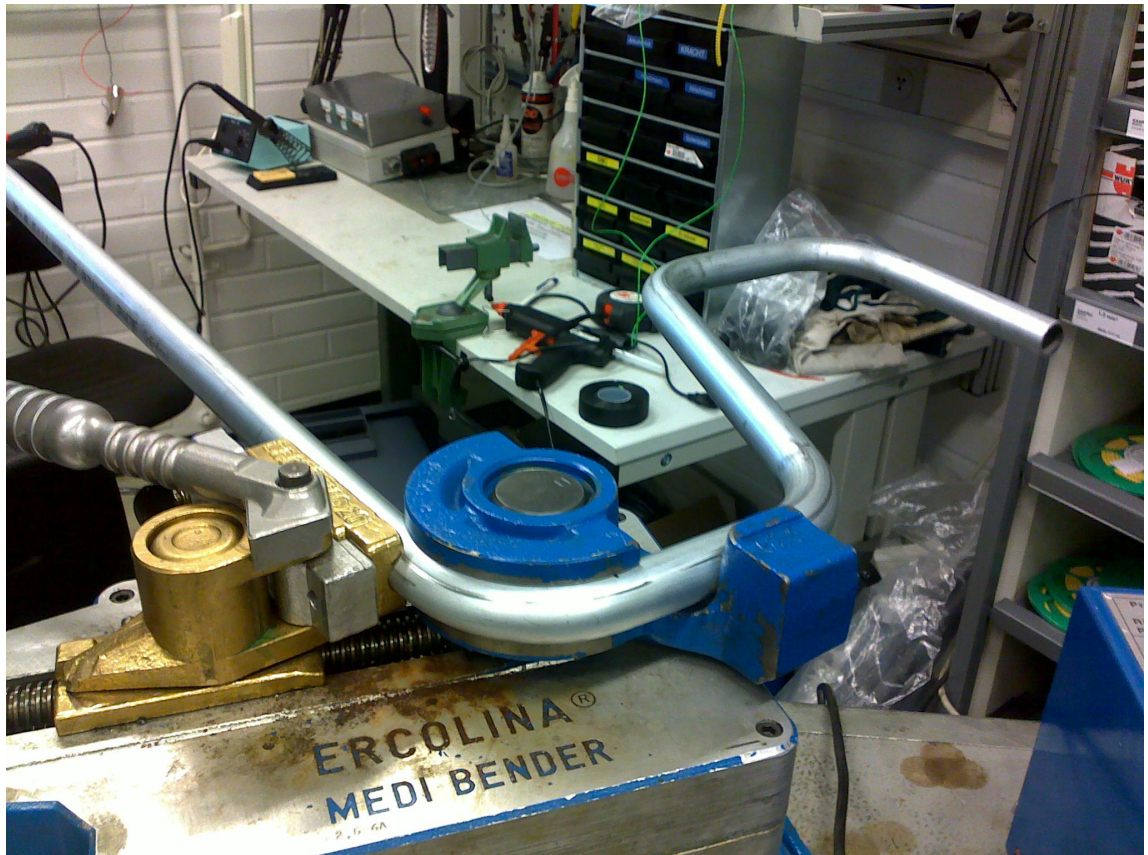


Kuva 5.1. Kampiakseli on tuettu vain toisesta päästä ja siihen kohdistetaan 1kN voima.



Kuva 5.2. Kampiakseli on tuettu kummastakin päästä, voima 1kN.

Akselin ensimmäinen prototyyppi väännettiin putkentaivutuskoneella hydraulikka-putkesta, jonka ulkohalkaisija on 25 mm ja seinävahvuus on 2,5 mm. Ennen putken taivuttamista kampiakselista luotiin konepiirustus CAD-ohjelmistolla, jonka pohjalta putkea väännettiin. Ensimmäisen prototyypin valmistus oli lähinnä taivutuskoneen ominaisuuksin tutustumista, mutta silti akselista saatiin aivan kelvollinen. Taivuttaminen toteutettiin hydraulikan ja automatiikan laitoksen raskaassa laboratoriossa olevalla putkentaivutuskoneella.



Kuva 5.3. Putken taivuttamista kampiakseliksi.

Akselin toiseen päähän tehtiin kiinteä laakeripesä. Laakeripesä valmistettiin sorvaamalla terästangosta ja se kiinnitettiin akseliin hitsaamalla. Hitsatessa käytettiin apuna toimenpidettä varten valmistettua hitsausjigiä. Akselin toiseen päähän ei voi kiinnittää laakeripesää kiinteästi, koska silloin polkimien laakereita ei voida vaihtaa. Tuotteen suunnittelussa otetaan huomioon elinkaariajattelu ja tuotteen elinkaareksi kaavailaan pitempää kuin polkimien kesto, joten poljinlaakerien vaihtamisen on oltava mahdollista.

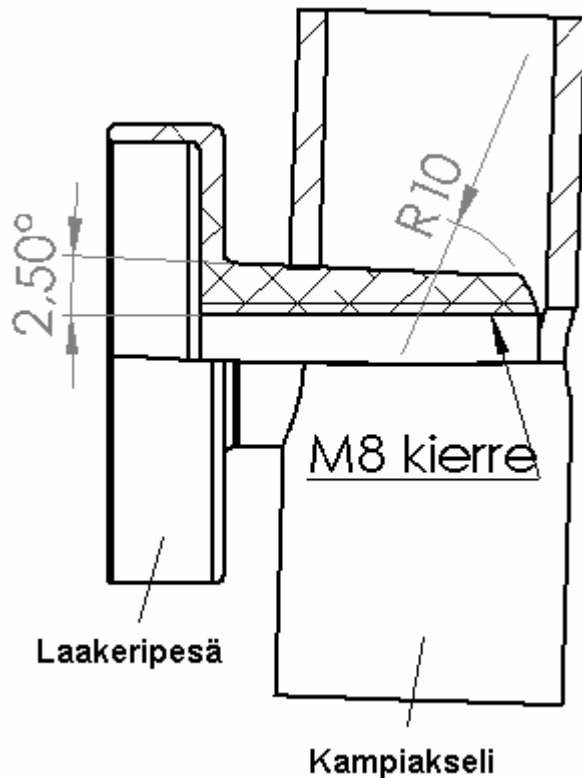


Kuva 5.4. Kiinteän laakeripesän hitsaus jigissä.

Ratkaisua haettiin TRIZ-menetelmää apuna käyttäen, jolloin ristiriidaksi muodostui kiinteä mutta irrotettava laakerointi. Laakeri on voitava kiinnittää akseliin, mutta sen on silti oltava irrotettavissa tarpeen vaatiessa, joten ratkaisuna ongelmaan on ruuvikiinnitteinen laakeripesä. Ruuvikiinnityksellä osa saadaan yhtenäiseksi ja siihen jää irrottamisen mahdollisuus.

Ensimmäisessä laakerointi-prototyypissä akseliin kiinnitettiin tappi, johon laakerin sisäpinta kiinnitettiin. Tällaisella apuakseliratkaisulla, jossa laakeripesä olisi sijoitettu runkoon, ei olisi voitu käyttää rungon kummallakin puolella samanlaista kiinnitystä. Ensimmäinen prototyyppi todettiin tältä osin toimimattomaksi ja siksi ongelmaan etsittiin toisenlaista ratkaisua. Ratkaisu oli ilmeinen; akseliin kiinnitetään laakeripesä, jolloin akselin ripustuksista runkoon voidaan tehdä samanlaiset.

Toinen laakerinkiinnitysprototyyppi onnistui hyvin. Laakeripesä suunniteltiin alusta asti valmistettavuutta silmälläpitäen. Laakeripesä on valmistettavissa NC-sorvilla yhdellä kiinnityksellä. Laakeripesä kiinnitetään akseliin M8-ruuvilla, jolloin saavutetaan lujuusopillisesti tarpeeksi kestävä kokonaisuus.



Kuva 5.5. Laakeripesän kiinnityksen piirustus.

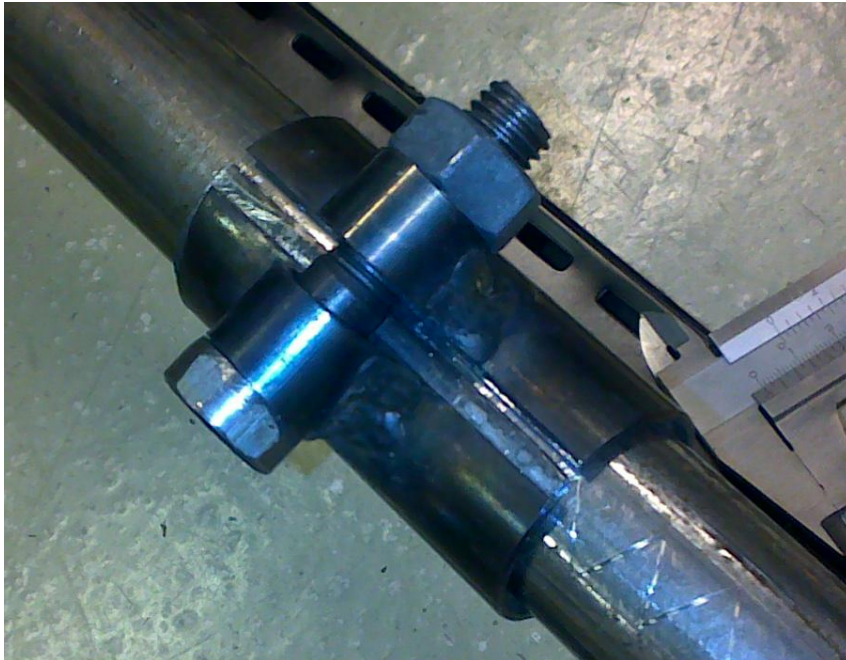
Laakeripesää varten akseliputkeen työstetään kaksi reikää. Laakeripesänvastaiselle puolelle putkea tehdään 8 mm reikä M8-ruuvia varten ja laakeripesänpuoleiselle puolelle 15 mm reikä. Laakeripesän varteen sorvataan 2,5 asteen laskeva kartio ja sen pää pyöristetään akseliputken sisäpinnan säteen arvoiseksi. Laakeripesä kiristyy kartion ansiosta isompaa reikään tiukasta ja pyöristetty pää kiinnittyy putken sisäpintaan, jolloin muodostuu sivusuunnassa tuki ja ruuville ei muodostu kuin pystysuuntainen rasitus.

5.1.2. Laakerointi

Laakerien valinnan lähtökohtana oli että käytettävien laakereiden tulee olla yleisiä peruslaakereita, joiden saatavuus on hyvä. Kampiakselin laakereiksi valikoitiin ensimmäiseen prototyyppiin 6004-laakerit, jotka ovat kooltaan 20x42x12 mm. Sisäreiän halkaisijaksi haluttiin kuitenkin 17 mm jolloin laakeriksi vaihtui 6203-laakeri. 17 mm sisäreikä mahdollistaa sen, että akselin vastakappaleena käytetään M12-pultteja. Pulttiin saadaan pienellä vaivalla pyöristetty pinta, mikä keskittää kampiakselin. Tällöin pienellä käsityöllä helpotetaan kampiakselin taivutusta, eikä virheellisiä kappaleita pitäisi syntyä.

Jotta kampiakseli voidaan kiinnittää runkoon, tarvitaan laakereille vastinkappaleet, jotka kiinnittävät laakerit keskireiästä. Käytettävyyden kannalta polkimien ja istuimen etäisyyden on oltava säädettävissä. Paras tapa säädettävyyden mahdollistamiseksi on tehdä kampiakselin paikasta säädettävä, jolloin istuin voi olla kiinteästi paikallaan. Tällöin kampiakselin laakerien vastinkappaleiden on oltava liikuteltavia. Yksi tapa toteut-

taa säädettävä laakerin vastinkappaleiden kiinnitys olisi porata runkoon reikiä, joissa akselit olisivat. Tällöin säätö olisi portaallinen ja rungon lujuusominaisuudet heikkenisivät. Parempana tapana pidettiin erillistä osaa johon akseli kiinnitetään. Prototyypissä osaksi kokeiltiin pakoputkiklemmariä, jonka toinen kiristyspultti korvattiin laakerin sisäreiän halkaisija mukaisella akselilla. Paremmaksi vaihtoehdoksi kuitenkin havaittiin halkaistusta putkesta valmistettu akselin pidike.



Kuva 5.6. Kampiakselin laakeroinnin vastakappale. Laakerin sisäreikä asetetaan pyöristettyyn pultinkantaan.

Valituissa laakereissa sekä staattisen että dynaamisen kuormituksen kestot ovat riittävät. Dynaamista kuormitusta 6203-laakeri kestää 9,95 kN ja staattista 4,75 kN (SKF). Laakerien käyttöikä on myös käyttötarkoitusta ajatellen riittävä. Nojapyörä on suunniteltu huollettavaksi, joten laakerien vaihto on tehty mahdolliseksi.

Polkimien laakereiden valinnassa vaikuttava asia oli kampiakselin halkaisija. Laakerit joudutaan pujottamaan taivutettuun akseliin ja niiden on oltava vaihdettavat. Tästä syystä laakerien halkaisijan on oltava suurempi kuin kampiakselin halkaisijan. Kampiakselin halkaisijan ollessa 25 mm on seuraava saatavuuden ja hinnan kannalta järkevän kokoinen laakeri sisähalkaisijaltaan 30 mm. Tällainen laakeri on 6206, joka on kooltaan 30x62x16. Välystä jää laakerin ja akselin välille 5mm, joka täytetään holkillla.

5.1.3. Polkimien suunnittelu

Polkimien suunnittelu toteutettiin ideoinnin osalta TRIZ:in mukaisesti. Pääasiallinen ristiriita on kampiakselin ja lukkopolkimien yhteen sovittaminen. Laakeriksi, jonka ympärille poljin suunniteltaisiin, valittiin aikaisemmin 6206. Näin ristiriita muuttui laakerin ja lukkopolkimien väliseksi.

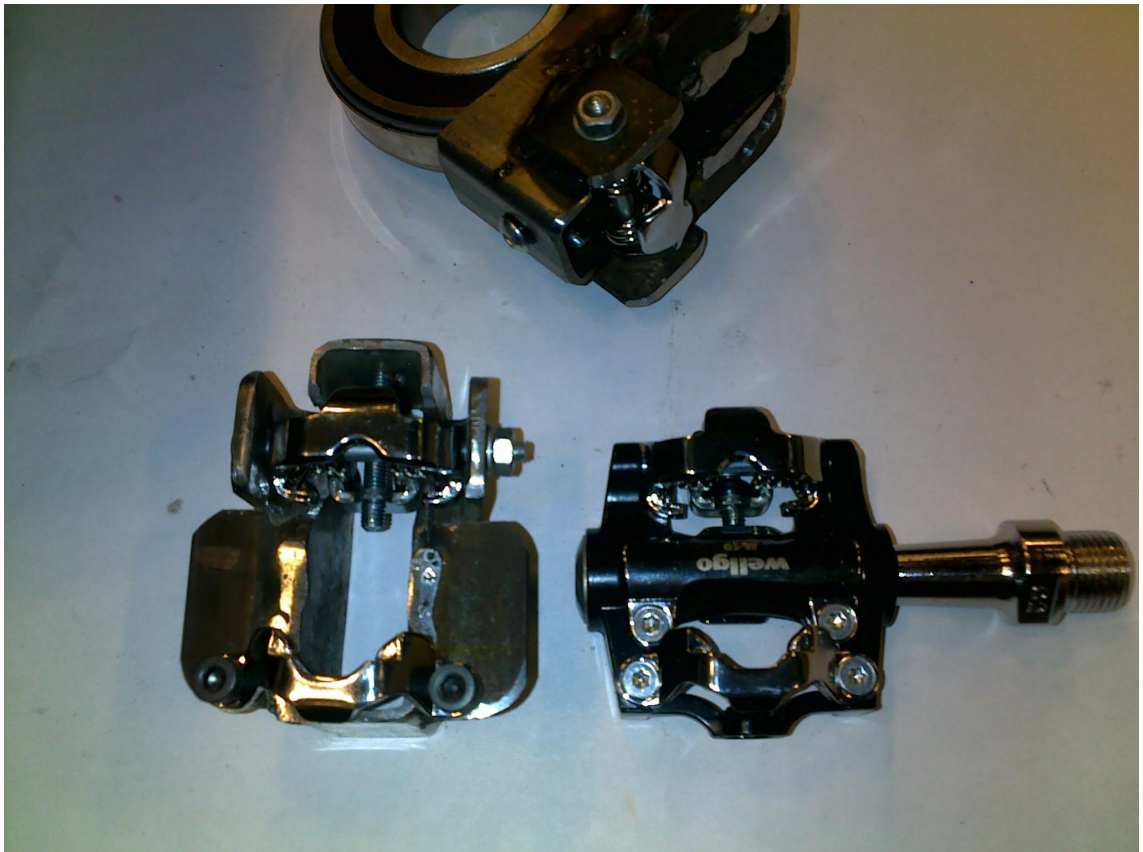
Lukkopoljin on suunniteltu siten että se kiinnitetään kierrereikään, kuten kaikki polkupyörien polkimet. Tähän nojapyörään tarvitaan poljin, joka kiinnittyisi 60 mm ulkohalkaisijan laakeriin. Yksi tapa ratkaista ongelma olisi kehittää adapteri polkimen ja laakerin väliin. Polkimessa on itsessään laakeroitu akseli, jota ei tarvita, koska poljin kiinnitetään laakeriin. Ensimmäiseksi askeleeksi ongelman ratkaisemisessa tuli siis polkimen kiinnitysmekaniikan erottaminen polkimen akselistä.

Lukkopolkimien toiminta perustuu usein jouseen, joka vastustaa rotaatiota. Kehitettävä poljin tarvitsi rungon, johon jousi voitaisiin kiinnittää. Suorakaideputkea on saatavilla 60x20x2 mm kokoisena, joka on sisäleveydeltään hyvin lähellä laakerin levyä. Polkimien kehittämistä varten hankittiin lukkopolkimet, jotka purettiin ja osat mallinnettiin CAD:illä. Näin voitiin tarkastella polkimien toimintaa ja niiden valmistamiseen käytettyjä osia. Sen jälkeen CAD:illä toteutettiin tarvittavien osien sekä suorakaideputken yhteenliittäminen. Tämän virtuaalisen simuloinnin perusteella luotiin piirustukset, joiden mukaan valmistettiin prototyypit polkimista.

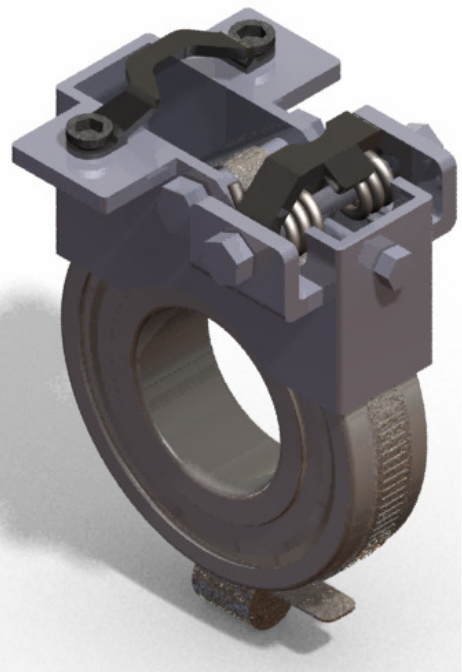
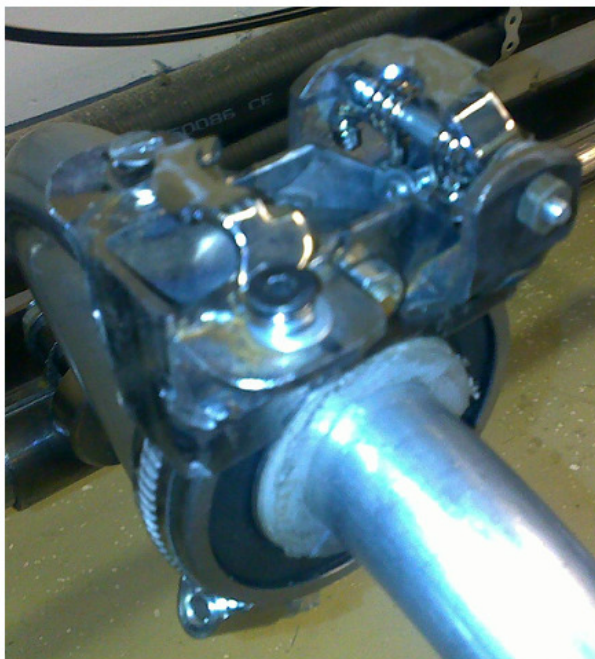
Prototypoimalla saatiin mitoitus kohdalleen ja kiinnitysmekanismi toimivaksi. Saatujen tietojen pohjalta valmistettiin polkimet nojapyörään. Polkimet suunniteltiin siten, että mekaanisesti kuluvat osat, kuten laakeri ja jousi, on mahdollista vaihtaa.

Polkimien rakenne on kohtuullisen yksinkertainen ja ne on mahdollista valmistaa ilman erikoistyökaluja metalliverstaalla. Polkimissa käytetyt osat kiinnitetään monesta kohtaa läpipultilla, joten reikien tolerointi on siten hyvinkin väljää, mikä osaltaan helpottaa valmistamista. Polkimien toimintaa testattiin ja ne toimivat hyvin. Ajoasennosta johtuen jalkojen kiinnittäminen ei ollut kuitenkaan yhtä helppoa kuin pystypyörällä, sillä kengät kiinnitetään vaakasuunnassa, jolloin polkimet pyrkivät painovoiman vaikutuksesta pyörähtämään alaspäin.

Polkimista tehtiin piirustukset, jotka ovat liitteessä 3.



Kuva 5.7. Kuvassa polkimen ensimmäiset prototyypit sekä Wellgo:n lukkopoljin, joka toimi lähtökohtana.



Kuva 5.8. Kuvassa valmistettu poljin sekä CAD-malli.

5.1.4. Ketjuveto

Voima siirretään kampiakselista vetävälle pyörälle ketjun välityksellä. Ketjupyörät muodostavat momentin joka välittyy ketjua pitkin. Tämä voima täytyy siirtää vetävän renkaan pyörimisliikkeeksi. Saadaksemme voiman siirtymään oikein on rungon oltava ketjuvedon suuntainen, jotta ei muodostu momenttia, joka vääntää runkoa.

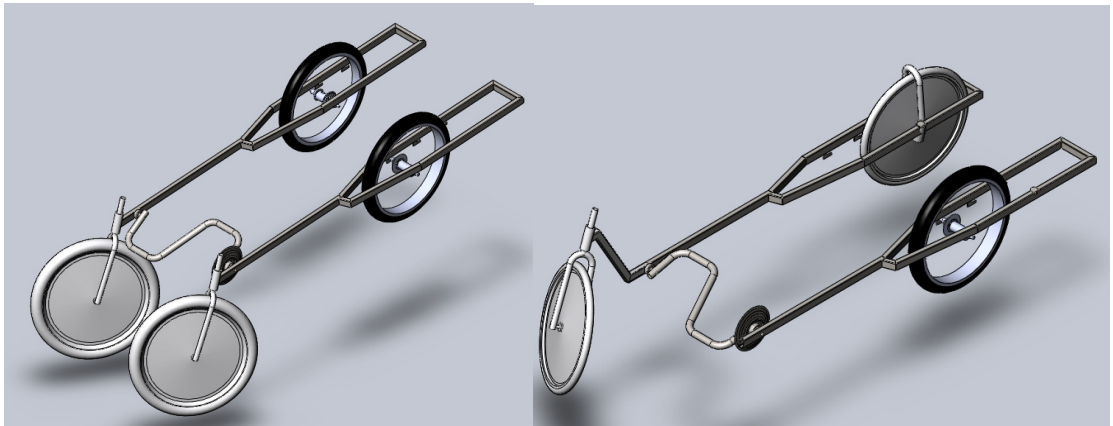
5.2 Runko

Rungon rakenne suunniteltiin SolidWorks mallinnusohjelmistolla. Ensin rungolle oli luotava karkea muoto, jonka pohjalta kehitettiin rungon yksityiskohtia. Kampiakselin ansiosta rungosta voitiin tehdä laitteen ulkomittoja noudattava, eikä perinteisesti käytössä oleva keskirungollinen malli.



Kuva 5.9. Vasemmalla on perinteisesti toteutettu keskirunko ja oikealla kampiakselin mahdollistama runkomalli. Ketjulinja on merkitty punaisella.

Rungon suunnittelu aloitettiin tyhjästä, eikä varsinaista esikuvaa suunnittelulle ollut. Jotta prototypointi oli mahdollista yliopiston tiloissa, materiaaliksi valikoitui teräs. Ensimmäisenä vaihtoehtona materiaaliksi oli rhs-putki.

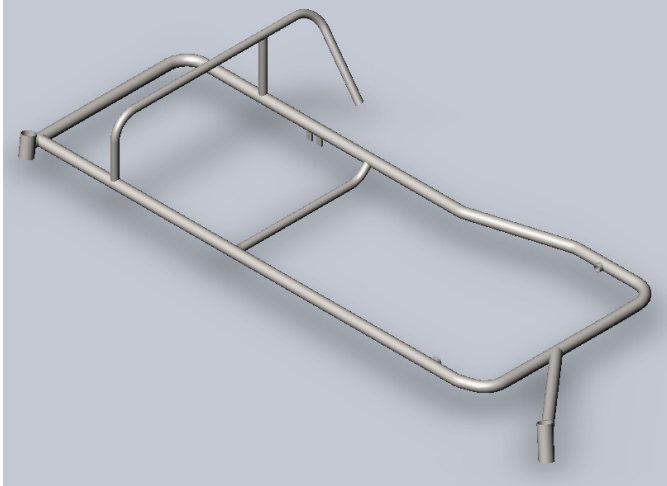


Kuva 5.10. Ensimmäiset suunnitelmat nojapyörän rungoksi. Vasemmalla on ensimmäinen ja oikealla toinen prototyyppi.

Suunnittelu aloitettiin vetävän pyörän ympäriltä. Ensimmäisiin suunnitteluversioihin kopioitiin vetävän pyörän haarukka myös toiselle puolelle. Ensimmäisessä versiossa ei ollut vielä kehitetty kolmipyöräistä rakennetta. Kolmipyöräistä kaksiraiteista rakennetta ryhdyttiin kehittämään heti ajatuksen keksimisen jälkeen. Kuvan 5.10. oikeanpuoleinen

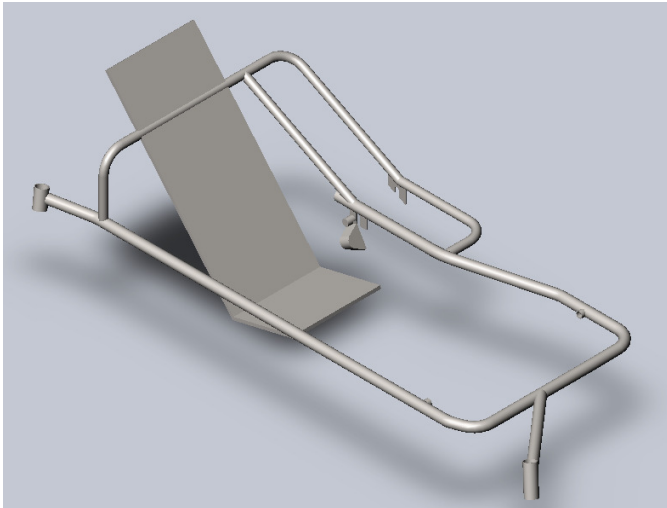
versio kuvaa tätä rakennetta. Rhs-putkesta mallinnetut runkoratkaisut olivat vajavaisia ja suorastaan rumia ulkonäöltään. Kampiakselistä oli tässä vaiheessa valmistettu prototyyppi.

Seuraava luonnollinen kehitysvaihe oli runkomateriaalin vaihtaminen pyöreään putkeen, jolloin voitiin käyttää samoja valmistusmenetelmiä kuin kampiakselin valmistuksessa. Putkentaivuttimella taivutettu putki mahdollisti pyöreiden kulmien tekemisen, jolloin rungosta oli mahdollista tehdä pyöreälinjaisempi.



Kuva 5.11. Mallinnus pyöreästä putkesta valmistettavasta rungosta.

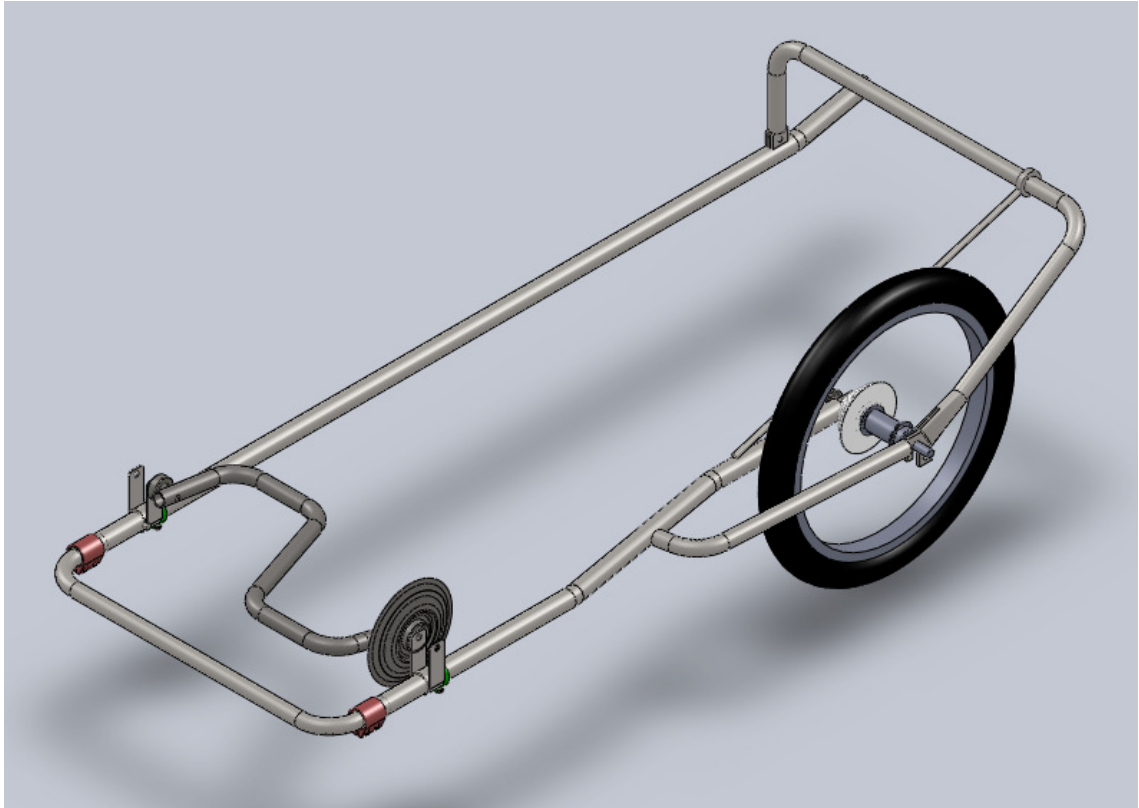
CAD-ohjelmalla tarkasteltaessa runko oli turhan painava, joten runkoa kevennettiin. Kuvasta 5.11. huomataan että rungon takaosassa kaksi putkea. Ylhäällä oleva ja takimmainen tukevat kumpikin runkoa takaosasta, joten molempia ei tarvita. Myöskään alin tuki ei ole välttämätön. Putkia optimoitiin painon vähentämiseksi.



Kuva 5.12. Mallinnus rungosta, jossa painoa on vähennetty poistamalla tukia.

Runko oli tässä vaiheessa mallinnettu siten että se koostuisi yhteenhitsatuista putkista. Rungon haluttiin kuitenkin koostuvan osista, joten oli keksittävä jokin muu osien liitosmenetelmä kuin hitsausliitos. Pyöreä putki mahdollistaa sisäkkäisliitoksen, jolla on perinteisesti toteutettu esimerkiksi polkupyörän satulapolpan kiinnitys runkoon. Liitok-

sesta tehtiin demokappale, jolla kokeiltiin kahden putken liittämistä toisiinsa. Yleisen halkaisijajaon mukaiset putket eivät suoraan sovi toisiinsa vaan vällys täytyi tiivistää väliholkillä. Tekniikka mahdollisti rungon koostumisen neljästä osasta.

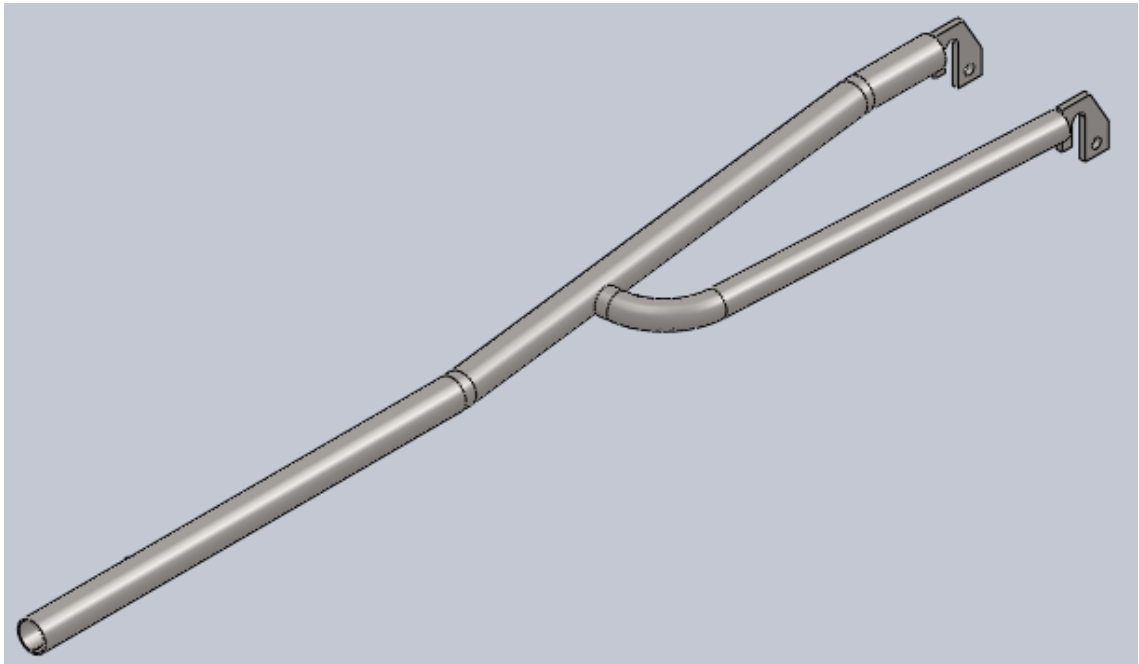


Kuva 5.13. Runko on mallinnettu neliosaiseksi.

SolidWorks mallista luotiin konepiirustukset, joita käytettiin taivutuskuvina putkien taivuttamiseksi. Seuraava vaihe piirustusten laadinnan jälkeen oli prototyypin valmistaminen piirustusten mukaan, jolloin huomattiin mitä rajoitteita on valmistusteknisesti. Lopullinen dokumentointi laadittiin valmistetun prototyypin perusteella, jotta valmistettavuus voidaan taata. Rungon prototypoinnista kerrotaan seuraavissa alaluvuissa.

5.2.1. Vetävä pyörä

Vetävä pyörä on ainoa joka sijaitsee kuljettajan oikealla puolella. Rakenteen ideana on, että tällöin vetävälle pyörälle saadaan kuljettajan massasta mahdollisimman suuri osuus. Voimansiirto on tällöin mahdollisimman tehokasta vetävän pyörän ja maan välillä. Vetävä pyörä toteutetaan tavallisen polkupyörän ratasvaihdenavan ympärille. Polkupyörän navat kiinnitetään kahdelta puolelta hahloihin, joista käytetään englanninkielistä nimitystä *dropout*.



Kuva 5.14. Vetävän pyörän haarukka mallinnettuna SolidWorksilla, vertikaalit dropoutit.

Vetävän pyörän ympärille tulevan takahaarukan valmistus aloitettiin 30 mm halkisijaisen putken taivuttamisella. Materiaalina käytettiin tavallista huonekaluputkea, eli ohutseinämäistä hitsattua putkea. Kampiakseli valmistettiin hydrauliihkaputkesta, mikä on paksuseinäistä, vedettyä, eli saumatonta putkea. Huonekaluputken taivutuksessa ei ollut vaikeuksia, joten materiaalina voitiin käyttää halkaisijaltaan 30 mm ja paksuudeltaan 1,5 mm seinämän putkea. Putkeen tarvittiin siirtymä sivusuunnassa, jotta ketju linja saatiin suoraan. Takahaarukan toinen puoli on halkaisijaltaan 25 mm 1,5 mm seinämäistä putkea.

Putket taivutettiin taivutuskuvan mukaiseksi ja niihin liitettiin dropoutit hitsaamalla. Dropuotit oli saatava suoraan, jotta pyörä olisi suorassa, eikä auraisi. Tässä prototypointivaiheessa takahaarukka hitsattiin ilman hitsausjigiä. Dropoutit kiinnitettiin vetävään pyörään ja haarukka koottiin pyörän ympärille. Takahaarukka koostuu neljästä osasta eli Ø30 mm putkesta, Ø25 mm putkesta sekä oikean ja vasemman puolen dropouteista.

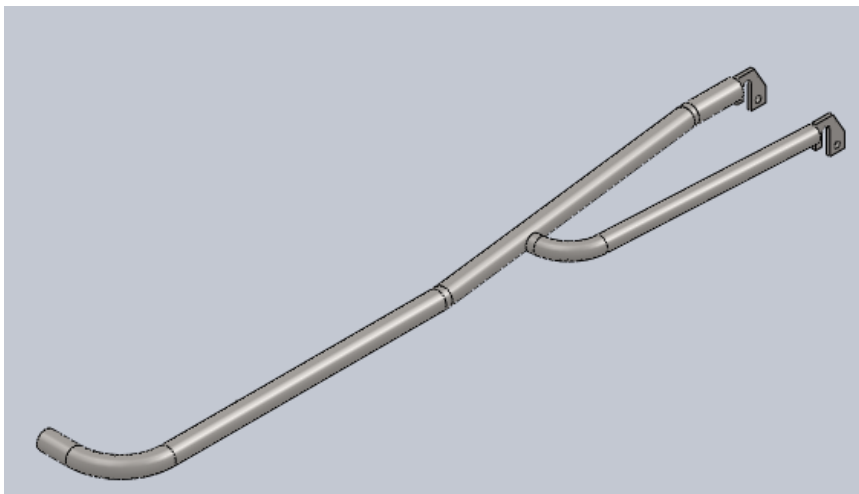
Ensiksi pidempi putki hitsattiin dropoutin kanssa yhteen. Hitsausliitosta varten putkesta poistettiin viipale ja se puristettiin. Viipale poistettiin, jotta putken korkeus puristettaessa pysyisi 30 mm.

Prototypoinnin yhteydessä huomattiin että suunniteltu puristusliitos ei pidä muodostuvaa vääntöä. Momentti, joka luo väännön, muodostuu polkijan painon vaikutuksesta. Nojapyörän tukipisteet, eli renkaat, sijaitsevat kulkuneuvon reunoilla ja polkijan painopiste on keskellä, joten muodostuva voima pyrkii kääntämään pyöriä sisäänpäin.



Kuva 5.15. Rungon moduulien liitos on kiinnitetty pakoputkiklemmareilla.

Suunnitteluvaiheessa tarkoituksena oli käyttää puristuksen tuottamiseen valmista standardiosaa, jolloin valmistettavuus paranee. Kyseiset osat ovat alumiinista valmistettuja, ja niiden pulttien esikivistysmomentti on noin 10 Nm. Prototyypissä käytettiin teräksisiä pakoputkiklemmareita jotka kiristettiin huomattavasti kireämmälle kuin 10 Nm. Rakenne ei ollut stabiili vaan liitos antoi periksi, varsinkin vetävän pyörän puolelta. Vetävän pyörän puoleista moduulia muutettiin saadun tiedon perusteella siten, että siihen tehtiin 90 asteen kulma päähän. Tällöin etukappaleesta poistui toinen 90 asteen taivutus. Muutoksella puristusliitos, joka piti vääntöä, muuttui momentiksi joka kohdistuu putkeen. 30 mm putki kesti muodostuvaa momenttia huomattavasti paremmin kuin puristusliitos kesti vääntöä. Moduuli pysyi muutoksen jälkeen yhä kaksiulotteisena, jolloin sen valmistettavuus sekä logistiset ominaisuudet pysyvät hyvinä.

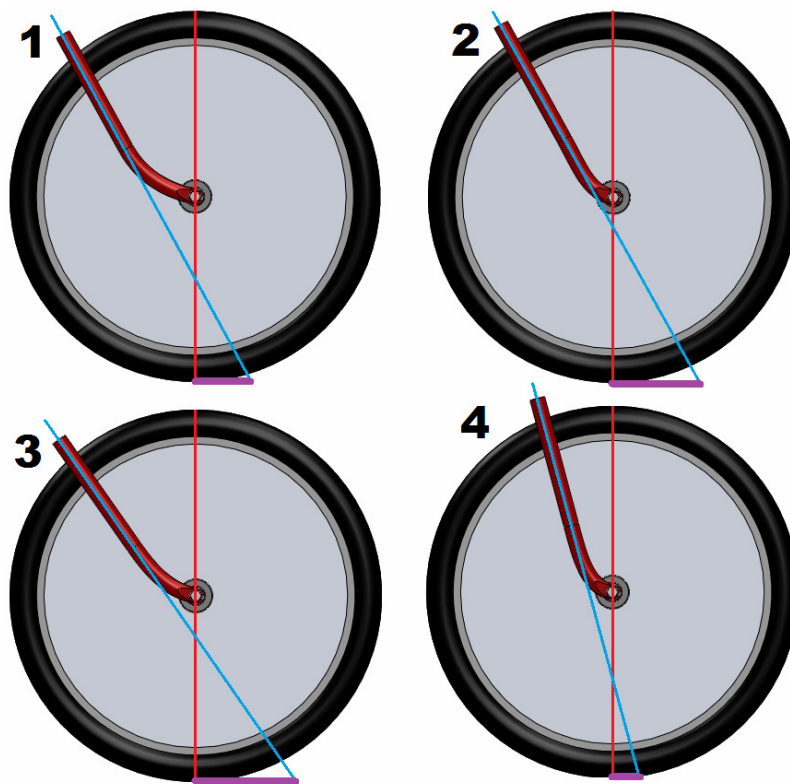


Kuva 5.16. Takahaarukan muutos, joka toteutettiin rasituskokeiden tulosten mukaan. Puristusliitos korvattiin momenttituella.

5.2.2. Ohjauslaitteisto

Ohjausgeometria

Kaksipyöräisissä kulkuneuvoissa, kuten moottori- ja polkupyörissä ohjaus tapahtuu kääntämällä etupyörää. Jotta kulkuneuvojen ohjaus olisi mahdollista, on kulkuneuvojen ohjausgeometriassa otettava huomioon tietyt asiat. Etujättö, joka muodostuu renkaan kosketuspinnan ja ohjausakselin suuntaisen suoran ja maanpinnan leikkauspisteen etäisyydestä, on ohjauksen stabiiliuden kannalta merkittävin tekijä ohjausgeometriaa suunniteltaessa.



Kuva 5.17. Etujätön (violetti) muodostuminen ohjauskulman ja haarukan offsetin mukaisesti. Kuvissa 1 ja 2 ohjauskulma on sama, haarukan offset muuttuu. Kuvissa 3 ja 4 offset on sama, ohjauskulma muuttuu.

Etujätön pituus vaikuttaa siihen miten kulkuneuvo käyttäytyy ohjattaessa. Lyhyellä etujätöllä on ketterämpi ohjattavuus, vastaavasti pidemmällä etujätöllä ohjauksesta tulee vakaampi. Ääripäihin mentäessä nolla tai negatiivinen etujättö tekee ohjauksesta epästabiilin ja eturengas pyrkii kaatumaan alle käännettäessä, joten negatiivista etujättöä voidaan perustellusti pitää jopa hengenvaarallisenä. Toisessa ääripäässä huomattavan suuri etujättö tekee ohjauksesta ylivakaan, jolloin ohjaus on raskasta. Etujätöksi valikoidaan kulkuneuvon mukaisesti käyttöön sopivin, maantielle rauhallinen ja kaupunkiympäristöön ketterä.

Etujättö voidaan laskea kaavalla

$$Trail = \frac{R_W \cos A_H - O_F}{\sin A_H} \quad (2)$$

jossa

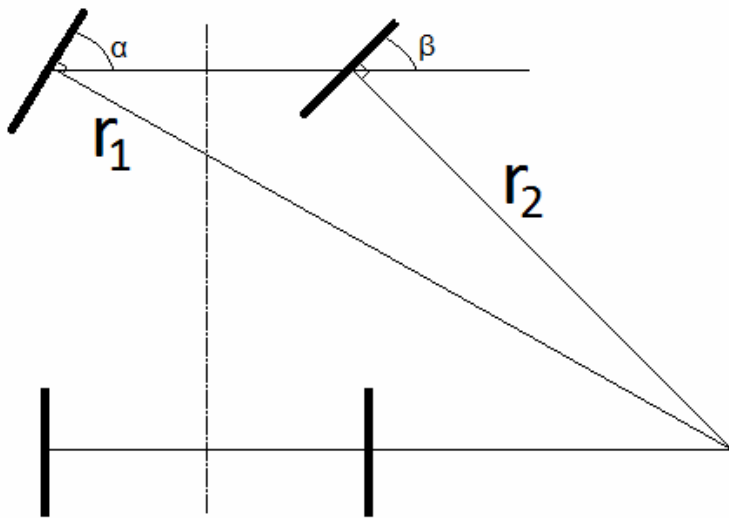
R_W = renkaan säde,

A_H = ohjauskulma

O_F = offset

Ackermannin ohjausgeometria

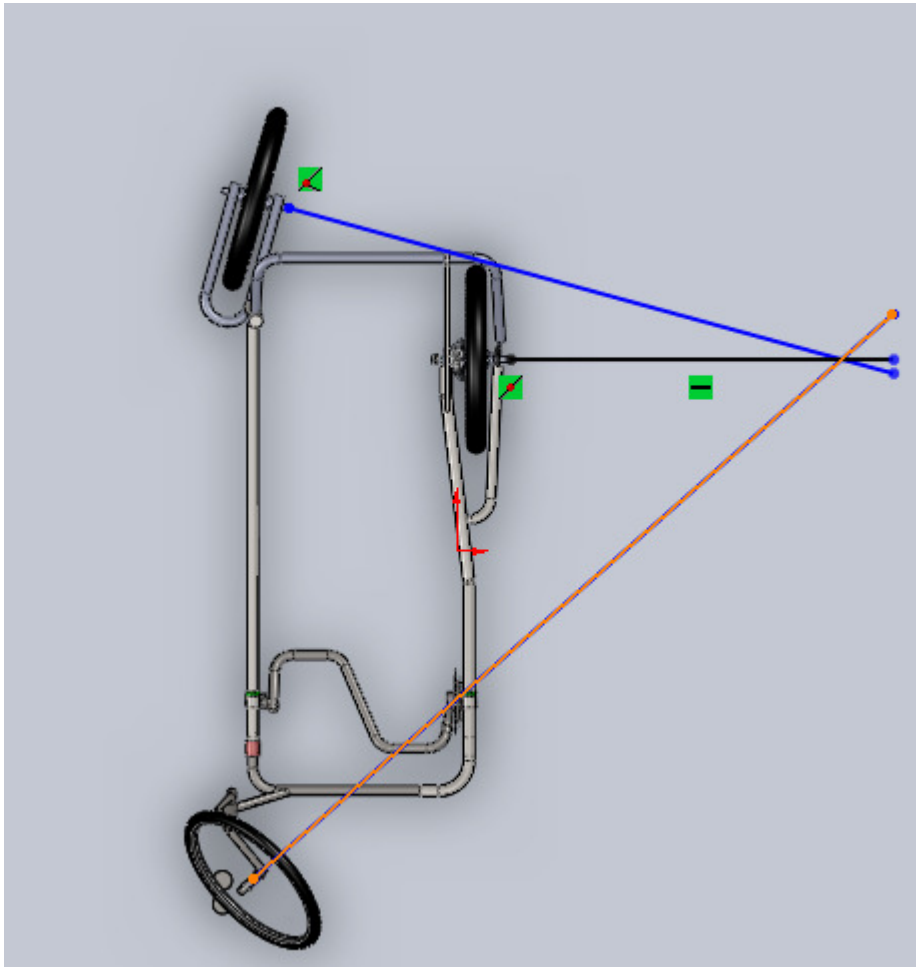
Ackermannin ohjausgeometriaa käytetään nelipyöრაisten kulkuneuvojen ohjausgeometrian suunnittelussa. Ackermannin ohjausjärjestelmän ideana on että raidetanko on lyhyempi kuin olkanivelten leveys, jolloin pyöriä käännettäessä niille saadaan aikaan kaksi eri kääntösädettä.



Kuva 5.18. Ackermannin ohjausgeometrian muodostuminen.

Kuten kuvasta 5.18. huomataan, ohjaavilla etupyörillä käännettäessä on eri kulmat sekä eri kääntösäteet. Kolmipyöრაisessä rakenteessa ohjaaville pyörille muodostuu kääntökulmat suhteessa vetävän pyörän akselisuoraan, jolle kääntösäde muodostuu.

Etummainen ja takimmainen pyörä hallitsevat ohjausta. Kummatkin ohjaavista pyöristä sijaitsevat nojapyörän oikealla puolella. Ohjaavien pyörien kääntösäteiden ja vetävän pyörän akselin kanssa yhdensuuntaisen viivan olisi tarkoitus kohdata leikkauspisteessä.



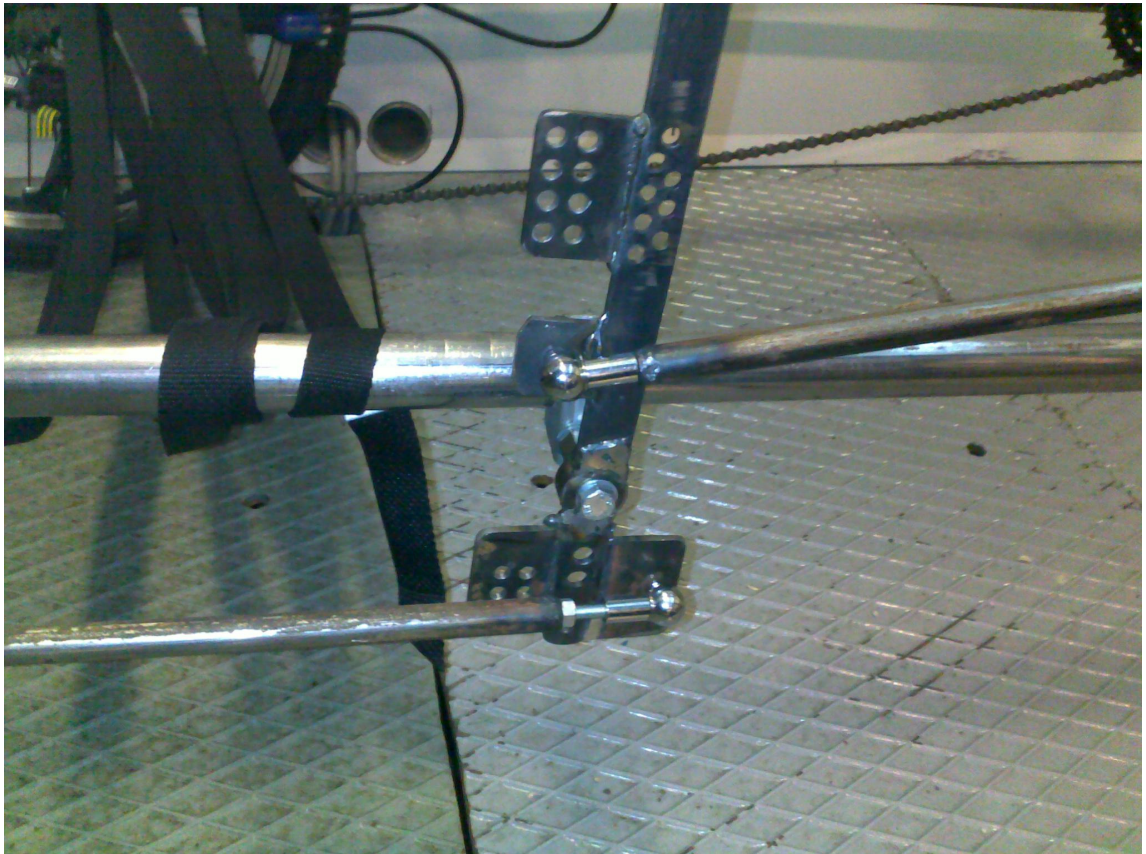
Kuva 5.19. Kääntösäteiden muodostuminen.

Kääntösäteen muodostuminen vaikuttaa ensivilkaisulta tasokuviolta. Toispuoleiset akselit ohjaavissa pyörissä tekevät geometrisestä kuvioista avaruusgeometrisen kuvion, jossa pyörien normaalit leikkaavat vetävän pyörän akselille pystysuoraan muodostuneen tason. Muuttujia on tällöin paljon ja ackermann-kulmien laskennasta tulisi erittäin vaikea yhtälö. Tässä työssä kulmat päätettiin laskea tasogeometrialla ja korjata epätarkkuuksia prototypointivaiheessa. Suuntaa-antavat tulokset sai laskettua helposti tällä tavalla.

Tuloksina saatiin niveltangoille pituudet. Kulmat tarkistettiin fyysisellä prototyypillä siten, että kääntyvät pyörät käännettiin niin että ne kohtaavat kääntöakselilla ja niiden kulma suhteessa kääntöakseliin mitattiin.

Tulosten perusteella valmistettiin ohjausmekanismista prototyyppi. Kaikkia muuttujia ei tiedetty, joten prototyyppi toteutettiin siten että sillä voitiin muuttaa kääntyvyyteen vaikuttavia arvoja helposti. Tämänkaltaisessa nojapyörässä, jossa sekä etu- että takapyörä kääntyvät toisella laidalla, on ohjausgeometrian toteuttaminen kompromissien hake- mista. Tässä projektissa tultiin siihen tulokseen että nopeuden ollessa kävelyvauhtia suurempi on tarvittava kääntösäde laaja ja pyörät kääntyvät vain vähän. Suurissa nopeuksissa pyörän sulava ohjaus on tärkeää turvallisuuden vuoksi, joten kääntävyys opti- moitiin pyörien kääntyessä 30 asteeseen asti, joka riittää hyvin kevyen liikenteen väylil-

lä. Tiukemmissa mutkissa, joissa tarvitaan pienempää kääntösädettä, on vauhtia hiljennettävä. 90 asteen käännös on joka tapauksessa tehtävä hiljaisessa vauhdissa, joten silloin pieni epätasaisuus kääntösäiteiden leikkauksessa ei aiheuta haittaa. Kokeilemalla löydettiin erittäin hyvä kompromissi, jolloin ohjauksessa ei huomattu loivissa eikä tiukoissa mutkissa sortamista etu- tai takarenkaan suhteen.



Kuva 5.20. Ackermann-kulmien hienosäätö toteutettiin ohjaussauvojen nivelpisteille etsimällä optimaalisimmat kohdat.

Nivelpisteiden etsintää varten ohjaussauvaan tehtiin huomattava määrä reikiä jotta kiinnityskohdat löytyisivät. Nivelpisteet siirrettiin ohjausakselilta sivuun, jotta sauvojen liike rauhoittuisi käännettäessä enemmän. Tällöin ohjaus on aluksi herkkää ja rauhoittuu paljon käännettäessä.



Kuva 5.21. *Olkanivelen etäisyyttä emäputkesta haettiin eri kiinnityspistein.*

Olkavarren pituus haluttiin mahdollisimman lyhyeksi, jotta ohjausvipu voisi olla mahdollisimman matala, myös ulkonäköseikat sanelivat ohjaussauvan sijoituksessa. Ohjaussauvan haluttiin olevan rungon kanssa samansuuntainen silloin kun pyörät ovat suorassa.



Kuva 5.22. Ohjaussauva toteutettiin mitatun geometrian mukaisesti.

Ohjaussauvan lopullinen muoto toteutettiin mitattujen tietojen mukaisesti. Ohjaussauvan muotoon vaikutti myös ergonomia, jotta nojapyörällä ajaminen ei rasittaisi käden lihaksi staattisesti. Ohjaussauvaan täytyi saada etujarrun kahva kiinni, joten standardiosat sanelivat käytettävän putken halkaisijan, joka on 22mm.

5.2.3. Muu rungon prototypointi

Takakaari on rungon osa, joka yhdistää rungon oikean- ja vasemmanpuoleiset osat rungon takaosasta. Takakaari toimii myös penkin tukena, joten siihen kohdistuu sekä momenttia että vääntöä.

Tässä nojapyörässä ei käytetä tavanomaista nojapyörän penkkiä. Syynä tähän on se että tavallinen penkki on suunniteltu putkirunkoon kiinnitettäväksi, joten sitä varten täytyisi runkoon tehdä keskiputki. Kiertävä runko mahdollistaa penkin kiinnittämisen reunoista, joten tätä ajatusta lähdettiin kehittämään.

Penkin toteutuksessa seuraava vaihe oli materiaalin valinta. Määrittäviä tekijöitä olivat kestävyys, niin lujuusopillinen kuin myös säänkestävyys. Materiaalivaihtoehdot voitiin jakaa kolmeen vaihtoehtoon, jotka ovat muovi, nahka ja kangas. Näistä paras materiaali käyttötarkoitukseen oli muovi. Materiaaliksi valikoitui liina, eli turvavyöateriaali.

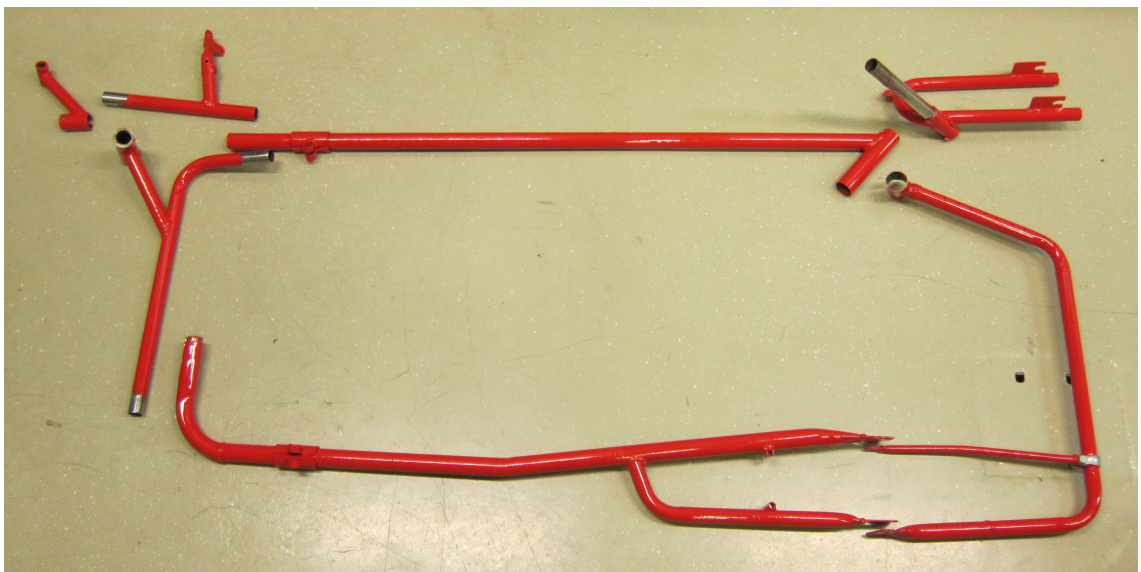
Valitun materiaalin johdosta penkin rakenteeksi tuli ristikko. Liina kiinnitetään runkoon toiselta puolen lenkillä ja toiselta puolen metallisilla koukuilla, joille porattiin reiät takakaariosaan.



Kuva 5.23. Istuin on valmistettu liinoista.

5.2.4. Runko kokonaisuutena

Runko koostuu toisiinsa liitettävistä osista. Modulaarisen rungon etu verrattaessa yksiosaiseen runkoon on se, että tällainen runko voidaan pakata huomattavasti pienempään tilaan kuin yksiosainen runko. Tuotekehityksen yhtenä ehtona oli valmistettavuus ja tuotteen kaupallisuus. Valmistus on usein muualla kuin tuotteen markkinat, jolloin logistiikan vaatimuksiin on vastattava. Rungon pääosista on piirustukset liitteinä yksi ja kaksi.



Kuva 5.24. Rungon osat pintakäsittelyn jälkeen.

5.3 Komponentit

Nojapyörään valittiin 20” eli 406 mm pyörät, joilla rakenne voitiin pitää matalana. Isommilla kiekkoilla polkeminen olisi kevyempää ja nopeus suurempi, mutta pyörän luonne muuttuisi. 20” pyörissä oli saatavana bmx-käyttöön tarkoitettuja 14 mm akselilla varustettuja pyöriä, jotka voitiin helposti muuttaa yksipuoleiseksi navaksi. 14 mm akseli kestää melko painavaa kuormaa yksipuolisella kiinnityksellä. Vertailuna voidaan mainita, että pyörätuolien yksipuoliset navat ovat 12 mm akselilla, joten 14 mm akseliin voitiin luottaa. Myös ohjaavalle eturenkaalle muodostuva kuormitus on pieni (mistä lisää lujuuslaskentaosuudessa), joten rakenne kestää.

Jarruiksi valittiin eteen perinteiset vannejarrut. Jarrut ovat hyvin vanhaa tekniikkaa ja niiden saatavuus on kohtalaisen hyvä. Hinnaltaan jarrut ovat erittäin edulliset. Jarrutusteholtaan kyseiset jarrut eivät ole lähelläkään parhaita mahdollisia, sillä tekniikka on kehittynyt hurjasti.

Vetävän pyörän jarruksi prototyyppiin laitettiin hydraulinen vannejarru, koska tällainen jarru oli saatavilla valmiina. Kyseisiä jarruja on saatavilla helposti, mutta niiden hinta on huomattava verrattuna vaijerikiristeisiin jarruihin. Jarrutusteholtaan hydrauliset jarrut ovat huomattavasti tehokkaampia kuin vaijeritoimiset. Jalkajarrulla varustettu nappa on myös mahdollista asentaa nojapyörään, jolloin siihen saisi perinteisen jalkajarrun. Levyjarrut tarvitsevat vannejarruista poikkeavat kiinnikkeet rungon osalta. Prototyypin runkoon ei nähty tarpeelliseksi tehdä levyjarrukorvakkeita, johtuen siitä että levyjarrukiekko tarvitsee omanlaisensa navan. 20” tuuman kiekkoja levyjarrunavalla ei ole yleisesti saatavilla, jolloin kiekot eivät olisi helposti saatavia standardiosia.

Vaihteeksi prototyyppiin laitettiin ulkoiset ratasvaihteet, hyvän saatavuuden ja edullisen hinnan takia. Haarukkaan on mahdollista laittaa napavaihde.

5.4 Rakenteen kestävyysarviointi

Nojapyörän kestävyys on tärkeää, niin turvallisuuden kuin tuotteen elinkaarenkin takia. Nojapyörä koostuu omavalmisteisista sekä tehdasvalmisteisista komponenteista. Tehdasvalmisteisten komponenttien osalta kestävyys ei pystytä vaikuttamaan muuten kuin komponenttien valinnan kautta.

Komponentteja valitessa usein suurimpana kriteerinä ovat kustannukset. Valmiit tuotteet voidaan usein jakaa, varsinkin polkupyöräkomponenttien kohdalla kolmeen eri ominaisuuteen, joita kuluttaja vertailee. Nämä ominaisuudet ovat hinta, kestävyys sekä paino. Hinta sekä paino ovat numeroarvoja, jotka ovat suoraan vertailukelpoisia.

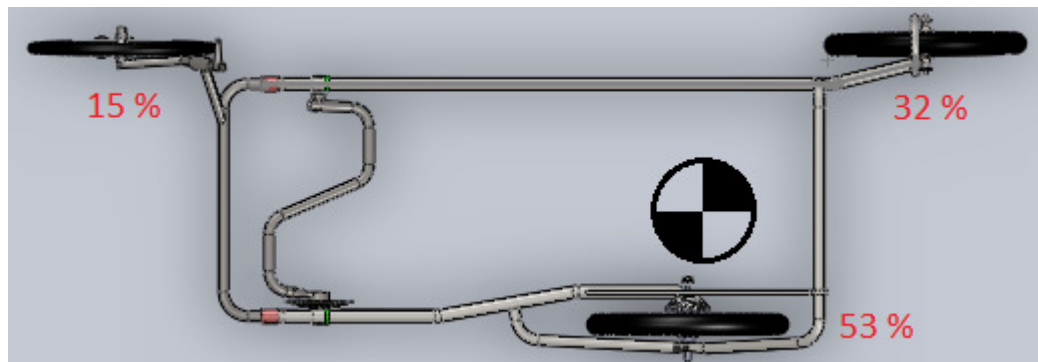
Kestävyys käsitteenä ei ole yhtä selkeästi vertailtavissa oleva ominaisuus kuin kaksi muuta. Kestävyysarvion yhtenä mittana voidaan pitää sitä, kuinka kauan tuote pysyy rikkoutumattomana. Kaikissa mekaanisissa laitteissa esiintyy mekaanista kulumista, joten

kulumiseen menevä aika voisi olla yksi kestävyysmitoista. Kestävyyttä on myös tuotteeseen kohdistuvien voimien vaikutus tuotteeseen, eli kyseessä on ominaisuus jota voidaan tarkastella lujuusopin menetelmin. Kaupallisissa komponenteissa on kuluttajan usein luotettava siihen että tuotteelle on suoritettu lujuuslaskennalla tarkastus, jotta sen kestävyys on luvatus mukaista. Kestävyudeksi voidaan laskea myös kuluvien osien korjausmahdollisuus ja huollettavuus. Tuotteen elinkaarta voidaan pidentää huoltamalla, jolloin huoltoon kulunut hinta olisi syytä olla vähäisempi kuin uuden osan hankinta.

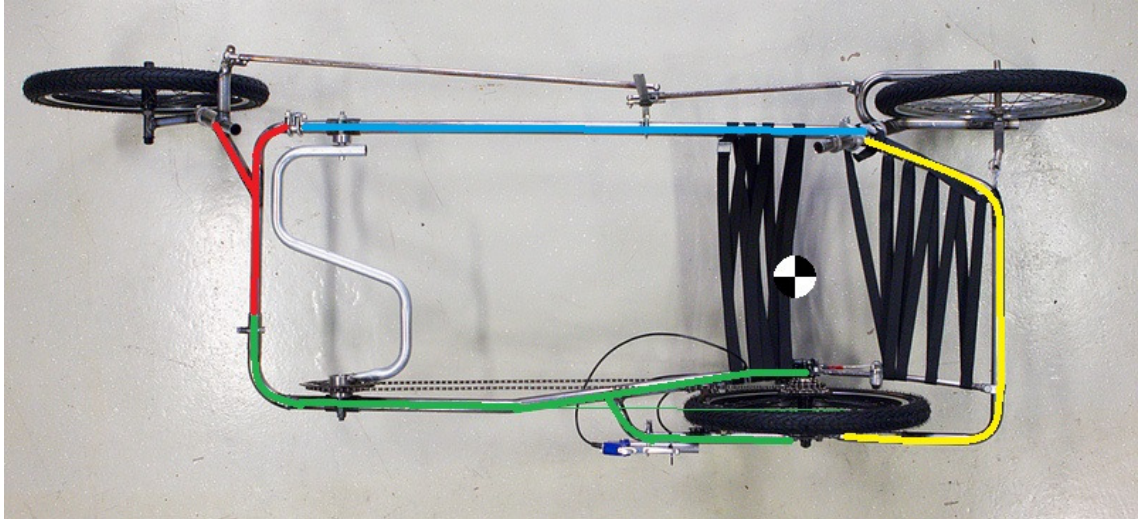
Itse valmistetuille osille suoritetaan kestävyysarvioimiseksi lujuustarkastelu FEM-laskennalla sekä osaltaan MathCAD laskentana. Rungon materiaaleille, eli runkoputkille lasketaan jännitykset myös Ruukin Optim1.0 lujuuslaskentaohjelmalla. Rungolle on myös fyysisen prototyypin ansiosta pystytty suorittamaan perinteistä rasituskokein tehtävää tarkastelua.

5.4.1. Rungon lujuustarkastelu

Nojapyörä on suunniteltu siten että vetävälle pyörällä saadaan mahdollisimman suuri massa, joten runkoon ei kohdistu tasainen kuormitus. Nojapyörän kolmelle pyörälle kohdistuu eri massa. Vetävälle pyörälle on saatu 53 % kuljettajan ja nojapyörän yhteismassasta. Ohjaavien pyörien painojakauma on 32 % ja 15 %, joista suurempi massa kohdistuu takarenkaalle ja pienempi massa eturenkaalle. Ohjaavalle eturenkaalle, kuljettajan painosta riippuen, ei kohdistu suurta rasitusta.

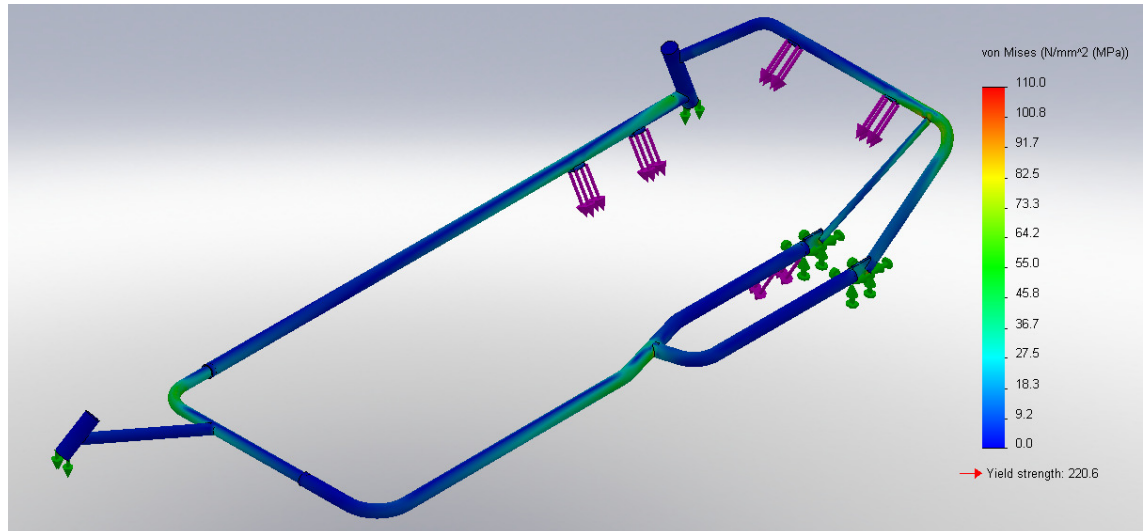


Kuva 5.25. Nojapyörän painojakauma prosentteina eri pyörille kuljettajan ollessa kyädissä.

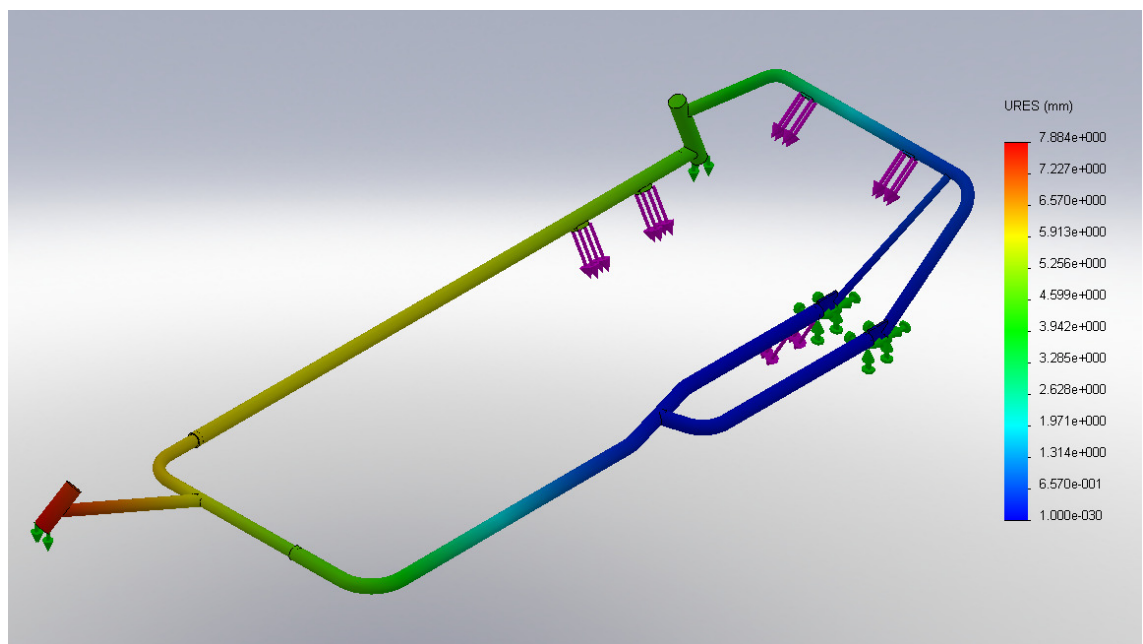


Kuva 5.26. Rungon putken on merkitty eri väreillä, jotta lukija tietää mitä rungon osaa tarkastellaan.

SolidWorks Simulationilla laskettiin suuntaa-antavia arvioita siitä mihin rasitus kohdistuisi. Laskennat ovat suuntaa-antavia arviota, koska kuormituksen muodostuminen oli arvaus. Tulos esittää suurimmat rasitukset oikeissa kohdissa ja jännitystasot ovat riittävän lähellä. Kuormitukseksi valittiin 1000 N.



Kuva 5.27. Runkoon kohdistuu suurin rasitus vetävän pyörän lähettyville. Ohjaavan etupyörän ripustukselle ei kohdistu suurta jännitystä. Kuormituksena 1000N.



Kuva 5.28. Rungon muodon muutos 1000N kuormituksella. Eturipustus siirtyy suurimman matkan.

FEM-kuvista huomataan että suurin jännitys muodostuu kääntyvän takapyörän emäputken kiinnityksen läheisyyteen. Maksimijännitys jää 1000 N kuormituksella 110 Mpa:n suuruiseksi, jolloin runkomateriaalina käytettävä huonekaluputken varmuuskerroin on vähintään 2. FEM-laskennassa käytetty kuormitus on tasaista kuormitusta, joten

dynaaminen kuormitus, kuten tiessä oleva kuoppa, voi saada aikaan suuremman hetkellisen jännityksen. Jännityksen noustessa murtorajan yli on iskun oltava huomattavan suuri, joten rungon ei uskota särkyvän ajossa.

Rungon liikkeet ovat laskemalla saatujen tulosten perusteella odotetun kaltaisia. Vaikka eturipustukseen ei kohdistu suurta kuormitusta rakenteesta johtuen, liikkuma on siinä suurin, kuitenkin alle 1 mm, jota voidaan pitää merkityksettömänä.

Rungon osille Ruukki optim1.0 ohjelmalla laskemalla saatiin seuraavanlaiset tulokset. Eturipustuksen osalta, kuvassa 5.26. punainen osa, laskettiin taivutuksen aiheuttama jännitys. Kuormitukseksi laitettiin 150N, mikä on 15 % FEM laskuissa käytetystä 1000N. Laskenta antoi tulokseksi 73 MPa:a, mikä on huomattavasti enemmän kuin FEM laskennan tulos. 73 MPa:n jännityksellä saavutetaan eturipustukselle yli kolminkertainen varmuus.

Oikean puolen putkelle, joka kuvassa 5.26. sininen, laskettiin tasaisella kuormituksella 500N kuormitusta käyttäen jännitykseksi 137 MPa. Laskennalla tarkastellaan rungon jännitystä kuljettajan istuessa penkillä. Tasainen kuormitus sopii tilanteeseen hiukan paremmin kuin taivutus, koska istuin on kiinnitetty putkeen monesta kohtaa. Varmuuskertoimeksi muodostui tällöin noin 2.

Takakaaren, kuvassa 5.26. keltaisella, jännitykset laskettiin taivutuksella. Tällä tavalla pyrittiin mukailemaan nojaamisesta muodostuvaa räsitusta rungolle. Voimana käytettiin 200N, jolloin jännitykset ovat 130 MPa. Varmuuskerroin on noin kaksi.

Liitteessä 4 on laskettu millaisia voimia muodostuu. Näitä arvoja käytettiin Ruukin optim1.0 laskennassa apuna.

Yhteenveto lujuuslaskennasta

Laskenta suoritettiin kolmella eri ohjelmalla, joiden tuloksia vertailtiin keskenään. Tulosten samankaltaisuuden ansiosta tuloksia voidaan pitää tarpeeksi tarkkoina, varsinkin kun varmuuskerroin oli riittävä. Lujuuslaskennassa laskettiin lähinnä staattisten voimien aiheuttamaa kuormitusta. Dynaamisen rasituksen voimia ei varsinaisesti laskettu, mutta nojapyörällä suoritettujen lukuisien testiajot eri painoisilla kuljettajilla näyttivät toteen rungon kestävyys.

5.5 Testaus

Nojapyörän testaus oli erittäin oleellisessa osassa koko projektin ajan. Testaaminen aloitettiin heti projektin alussa. Alussa, ennen fyysisen prototyypin valmistuksen aloittamista, testaus oli simulointia CAD-ohjelmalla.

Fyysisen prototyypin valmistuksen aloittamisen yhteydessä ryhdyttiin testaamaan ideoita ensin osina sekä osakokonaisuuksina. Fyysisen prototyypin valmistuksen kantavana ideana oli testaamisen mahdollisuus, jota hyödynnettiin tässä projektissa paljon. Valmistamalla ideasta prototyyppi ja testaamalla miten se toimii, voitiin monen idean

kohdalla tehdä karsinta jatkamisen ja ideasta luopumisen välillä aikaisessa vaiheessa testauksen ansiosta.

Testaaminen oli aluksi osien ja ideoiden valmistettavuuden ja toimivuuden tutkimista. Nojapyörän rungon valmistuksen jälkeen voitiin aloittaa komponenttien yhteensopivuuden testaaminen. Ensimmäisen ajokuntoisen nojapyörän prototyypin jälkeen voitiin aloittaa varsinainen testaus, jolloin tutkittiin nojapyörän ominaisuuksia sekä kestävyyttä.

Ajettavan nojapyörän prototyypin jälkeen testaamista harjoitettiin runsaasti. Laitosten laboratoriotyöntekijät testasivat nojapyörää mielellään ja monet muutkin ihmiset ajoivat nojapyörällä kesän aikana. Monen eri testikuljettajan käyttämisen etuna oli se, että nojapyörää kokeilivat eri pituiset ja painoiset henkilöt. Nojapyörän kehityksessä yhtenä toiveena oli se, että tuote sopisi mahdollisimman monelle, joten oli tärkeää kuulla mahdollisimman monen testaajan mielipide. Projekti herätti nojapyöräharrastajien keskuudessa mielenkiintoa ja muutama harrastaja kävi tutustumassa projektiin, samalla testaten nojapyörää ja antaen palautetta toimivuudesta ja ominaisuuksista joita tarvitsisi kehittää.

Nojapyörä oli esiteltävänä Nokialla järjestetyissä nojapyöräsuomenmestaruuskilpailuissa, missä se herättikin huomiota. Palaute oli positiivista ja kokeneiden nojapyöräilijöiden näkemykset ja kehitysehdotukset olivat rakentavia.



Kuva 5.29. Nojapyörän koeajoa.

6 YHTEENVETO

Yksinkertaiselta tuntuvan mekaanisen laitteen suunnittelun olen tämän työn tekemisen yhteydessä huomannut erittäin monipuoliseksi. Tämän projektin tarkoituksena oli pyrkiä kehittämään uudenlainen, mielellään totutusta poikkeava nojapyörämalli. Projektin aikana pyrittiin tutkimaan ja kehittämään mahdollisimman monia uusia ja toivottavasti ennen kokeilemattomia ideoita nojapyöriin.

Tässäkin projektissa, kuten tuotekehitysprojekteissa usein, aloitettiin tutustumalla olemassa olevaan tekniikkaan. Nojapyörät olivat itselleni entuudestaan tuntemattomia, mutta niiden tekniset ratkaisut ovat pitkälti samoja kuin tavallisissa pystypyörissä, joten tekniikkaan pääsi hyvin sisälle.

Tässä diplomityössä esiteltyt teoriat toimivat projektissa vaihtelevasti. Pahlin ja Beitzin standardin VDI-2221 mukainen tuotekehitysprosessi oli tämän työn tuotekehitysprosessin pohjana. Metodina pyrittiin monipuolistamaan Ulrichin ja Eppingerin sekä Wrightin teorioiden avulla, mutta ne eivät tarjonneet VDI-2221:n paljoa lisäarvoa. Ongelmanratkaisumetodi TRIZ oli käytössä yksittäisten komponenttien, kuten polkimien, suunnittelussa, ja se soveltuikin tämänkaltaisten komponenttien tuotekehitykseen hyvin.

Valmistettavuutta käsittelevät teoriat on tarkoitettu lähinnä sarjatuotantoa ja teollista toimintaa tukeviksi, joten niiden soveltaminen tässä projektissa jäi melko pintapuoliseksi. Nojapyörän tuotekehityksessä oli yhtenä näkökulmana se, että tuotetta voisi valmistaa piensarjatuotantona, joten teorioihin tutustuminen ei siten mennyt hukkaan.

Hands on Engineering oli itselleni uusi käsite, mutta idea soveltui hyvin tähän projektiin. Hands on Engineering käsitteen ideana on kokeellinen suunnittelu, eli ideoista pyritään mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tekemään prototyyppejä. Käsitteen alla esitelty CDIO-menetelmä on opetuksen viitekehys, joka on käytössä osassa Tampereen teknillisen yliopiston kursseista, mutta se ei varsinaisesti liittynyt aiheeseen. Tämän diplomityön tekeminen edellytti käytännön ja teorian yhdistämistä, joten CDIO:n periaate toteutui siten.

Modulaarisuutta pyrittiin hyödyntämään nojapyörän suunnittelussa, ja lopputuloksena syntynyt malli on osin modulaarinen. Moduloinnin teorioita käytettiin hyödyksi kuitenkin vain pintapuolisesti ja modulaarisuus ilmeneekin siinä, että osilla ja komponenteilla on rajapinnat ja niistä koostuu kokonaisuus, eli modulaarisuuden määritelmä täytetään.

Polkimien heikko käytettävyys tuli ilmi testauksen yhteydessä. Varsinkin Nokialla järjestettyjen nojapyöräkilpailujen yhteydessä nojapyöräharrastajilta saadun palautteen

mukaan pyöräilykenkien kiinnitys polkimiin oli hankalaa, koska polkimet kääntyivät helposti pois kengän alta.

Nojapyörään kehitettiin ideoita, jotka poikkeavat tavanomaisista ratkaisuista. Suurin uusi idea oli voimansiirrossa, jossa ei käytetty polkupyörän kampia, vaan suunniteltiin kampiakseli, jolloin runko voitiin levittää kuljettajan ympärille. Tämä ratkaisu toi nojapyörälle uudenlaisen runkorakenteen ja siten koko ulkomuodon. Kampiakseli mahdollisti pyörien uudenlaisen sijoittelun, jossa vetävä pyörä on omalla sivullaan ja ohjaavat toisella. Rakenne mahdollisti kahden pyörän kääntymisen, minkä ansiosta saimme pienennettyä kääntösädettä. Kahden kääntyvän pyörän yhtäaikainen toiminta ei ole ideaalinen ratkaisu, mutta saavutimme kompromissin, jolloin kääntyvyys oli riittävän hyvä.

Rungon rakenne koostuu toisiinsa liitettävistä osista, jolloin sen valmistus esimerkiksi Aasiassa ja kuljetus sieltä Eurooppaan on mahdollisimman helppoa. Ideana oli myös se, että rungon voisi purkaa osiin säilytyksen ajaksi. Rungon materiaalina oleva teräs saattaa kuitenkin pitkään ulkona ollessaan ruostua yhdyskohdista kiinni, jolloin osat eivät enää irtoa sujuvasti. Siksi runko toimii parhaiten niin, että sitä ei enää kasaa-misen jälkeen purettaisi osiin.

Teorioiden mukaan tuotekehitysprojektien päämääränä on kaupallinen tuote, joten nojapyörän kaupallista potentiaalia mietittiin projektin aikana. Valmistettavat osat ovat melko yksinkertaisia, mutta vaativat kuitenkin käsityötä, jolloin tuotteen hinta on korkeampi kuin automatisoidusti valmistettavan. Markkinat ovat oletettavasti pienet, koska nojapyörät ovat marginaalituotteita tavallisiin polkupyöriin verrattuna. Nojapyöriä on monia erilaisia, joten kun haetaan asiakassegmenttiä, joka olisi kiinnostunut kyseisestä nojapyörästä, pieni osuus jakautuu vielä. Ainoana vaihtoehtona tuotteen kaupalliseksi potentiaaliksi olisi piensarjatuotanto, jolloin tuotetta valmistettaisiin käsityönä kotimaassa ja räätälöitäisiin asiakkaiden toiveiden mukaisesti, jolloin korkea hinta olisi perusteltu.



Kuva 6.1. Nojapyörän prototyyppi valmiina ajoon.

LÄHTEET

Airila Mauri et al. 1997. Koneenosien suunnittelu. WSOY. 796 s.

Autio Arvo. 1992. Metallityöt. WSOY. 200 s.

CADworks Oy [WWW] Viitattu 13.4.2013 Saatavissa www.cadworks.fi

Crawley, E., Malmqvist, J., Östlund, S. & Brodeur, D. 2007. Rethinking Engineering Education. Springer. 286 s.

Lawrence E. Carlson & Jacquelyn F. Sullivan. 1999. Hands-on Engineering: Learning by Doing in the Integrated Teaching and Learning Program
Int. J. Engng Ed. Vol. 15, No. 1, pp. 20-31, 1999

Lehtonen Timo. 2007. Modulaarisen tuoterakenteen määrittäminen uuden tuotteen suunnittelussa. Väitöskirja. TTY. 222 s.

Lepola Pertti ja Makkonen Matti. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. WSOY. 429s.

Linden Tomas. 1997. Fillari-lehti numero 2/97. luettu [WWW] Viitattu 9.6.2012
Saatavissa: <http://www.helsinki.fi/~tlinden/nojapyor.html>

Lukkari Juha. 2002. Hitsaustekniikka: perusteet ja kaarihitsaus. Edita Prima Oy. 292 s.

Pahl G. & Beitz W. 1990 Koneensuunnitteluoppi (alkup. Konstruktionslehre. Handbuch für Studium und Praxis). MET. 608 s.

Poli Corrado. 2001. Design for Manufacturing: A Structured Approach. Butterworth-Heinemann. 375 s.

Randy H. Shih. 2012. Introduction to Finite Element Analysis Using SolidWorks Simulation 2012. Oregon institute of technology. SDC publications. 448 s.

Rantanen Kalevi. 2002. TRIZ-menetelmän hyödyntäminen tuotekehityksen ajatusmallina. MET. 129 s.

Röytiö, H. & Söderberg, K. 1993. Ohutseinäputket – ominaisuudet ja käyttö. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 101 s.

SFS 3052. 1995. Hitsaussanasto. Standardi. 122 s.

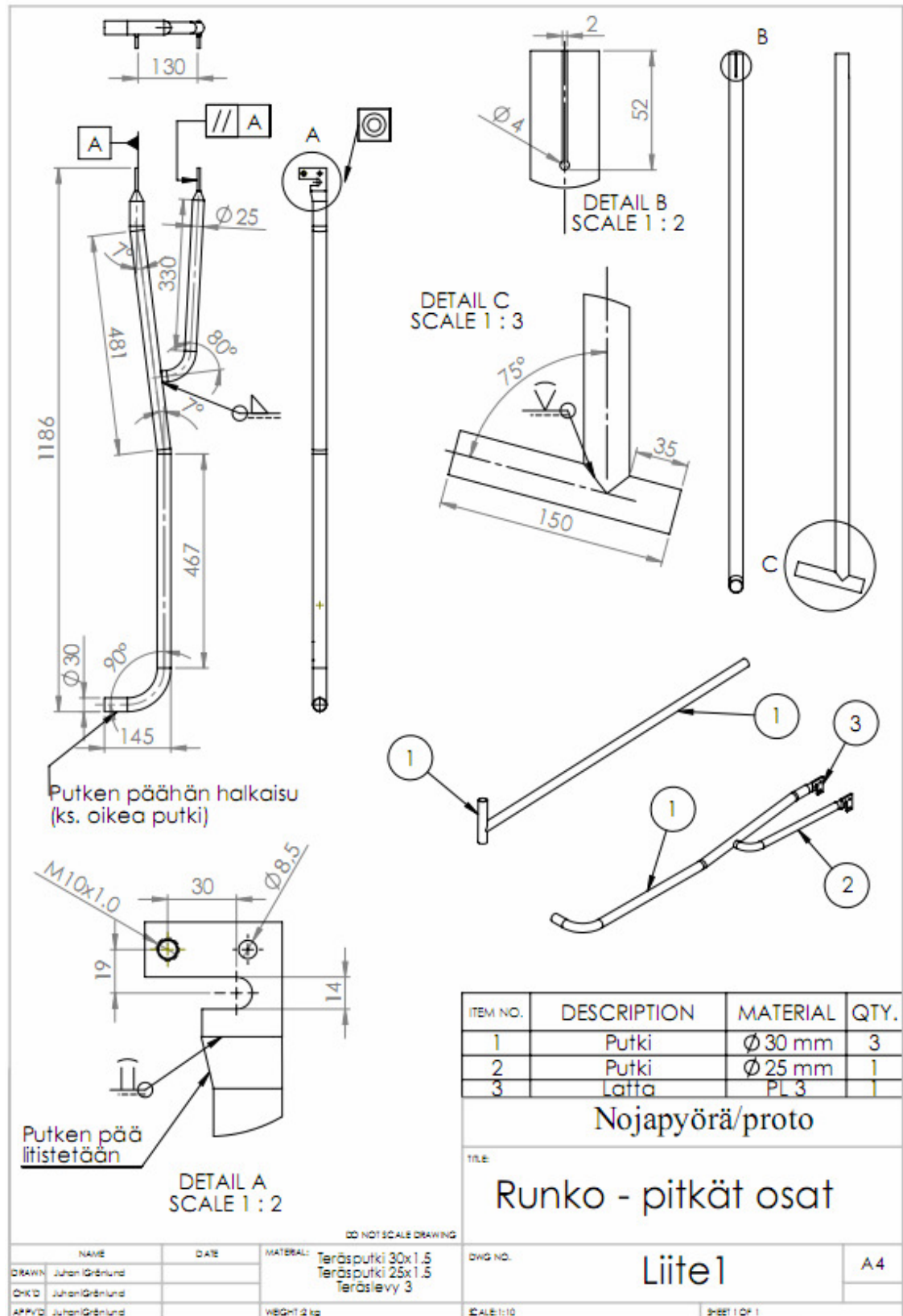
SKF laakerikatalogi. [WWW] Viitattu 20.11.2012 Saatavissa www.skf.com

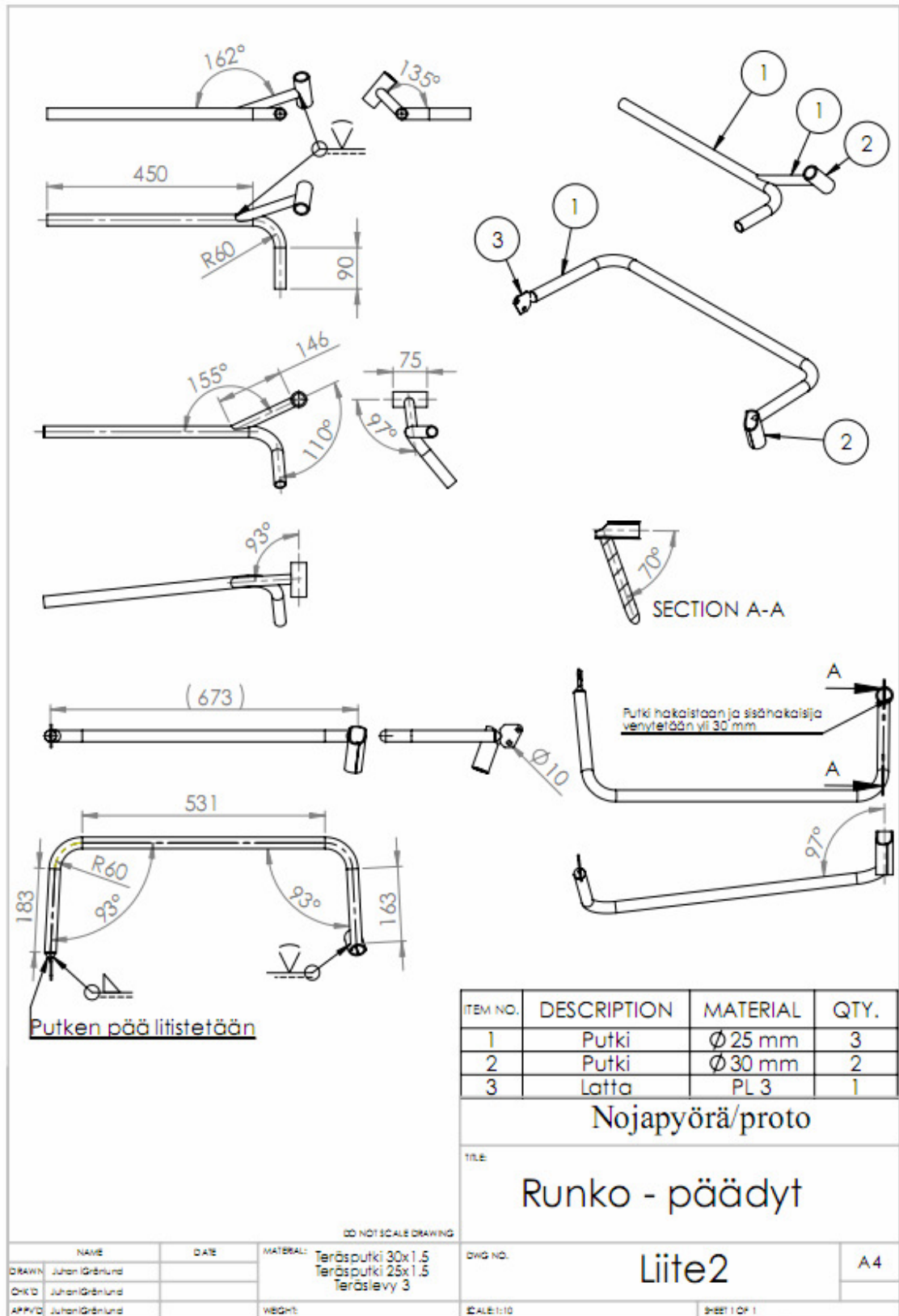
Thomke S.H. 1997. The Role of Flexibility in the Development of New Products. *research policy*. Harvard University

UCI Track Records. [WWW]. [Viitattu 9.6.2012]. Saatavissa:
<http://www.uci.ch/templates/UCI/UCI1/layout.asp?MenuId=MTUxMjc&LangId=1>

Ulrich K. & Eppinger S. 1995 Product Design and Development. McGraw-Hill. 289 s.

Wright Ian.1998. Design Methods in Engineering and Product Design. McGraw-Hill. 285 s.





Liite 4. MathCAD laskenta

Runkoputki 30x1,5

Runkoputki 25x1,5

$$I_{\text{putki25}} := \frac{\pi \cdot (25 \text{ mm})^4}{32} - \frac{\pi \cdot (22 \text{ mm})^4}{32}$$

$$I_{\text{putki30}} := \frac{\pi \cdot (30 \text{ mm})^4}{32} - \frac{\pi \cdot (27 \text{ mm})^4}{32}$$

$$I_{\text{putki30}} = 2,7347 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I_{\text{putki25}} = 1,5351 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Vihreä putki

Staatittiset voimat

Momentti kuljettajan massasta ~82kg (Miesten keskipaino) Massa jakautuu

$$\text{Momentti}_{\text{vihreä}} := 0,2 \text{ m} \cdot 400 \text{ N}$$

Dynaaminen voima

Kampiakseli tuottaa kulmaan pyöriessään alaspäin suuntautuvan voiman ~300N

Katukivetysten ylitys sekä tärinä tuottavat voiman, johon vaikuttaa kiihdytys.

Arvioksi vaikuttavasta voimasta käytetään 100N

Etukulmaan vaikuttavat voimat.

$$\frac{\text{Momentti}_{\text{vihreä}}}{2} = 40 \text{ J}$$

Momenttia kohden on kaksi vastamomenttia putken päissä.

Kampiakselin tuottama momentti, kun vipuvarsi 200 mm ja vaikuttava voima 300 N

$$\text{Momentti}_{\text{kampi_alas}} := 0,20 \text{ m} \cdot 300 \text{ N}$$

$$\text{Momentti}_{\text{kampi_alas}} = 60 \text{ J}$$

Kulman tuottama voima. Vihreän putken päässä 90 asteen kulma, jonka vipuvarsi

100 mm.

$$\text{Voima}_{\text{kulma}} := \frac{40 \text{ J}}{0,1 \text{ m}}$$

$$\text{Voima}_{\text{kulma}} = 400 \text{ N}$$

Sininen putki

Staatittiset voimat

$$\text{Momentti}_{\text{sininen}} := 0,3 \text{ m} \cdot 400 \text{ N}$$

$$\text{Momentti}_{\text{sininen}} = 120 \text{ J}$$

Punainen putki

Staatittiset voimat

Momentti vihreän ja punaisen osan yhdistävään kohtaan

$$\text{Momentti}_{\text{punainen}} = 0,15 \text{ m} \cdot 0,15 \cdot (800 \text{ N} + 150 \text{ N})$$

$$\text{Momentti}_{\text{punainen}} = 21,375 \text{ J}$$

Keltainen putki

Staattiset voimat

Putkeen kohdistuu vihreän sekä sinisen putken momentti sekä kuljettajan massasta

tuleva voima, joka muodostuu nojatessa.